

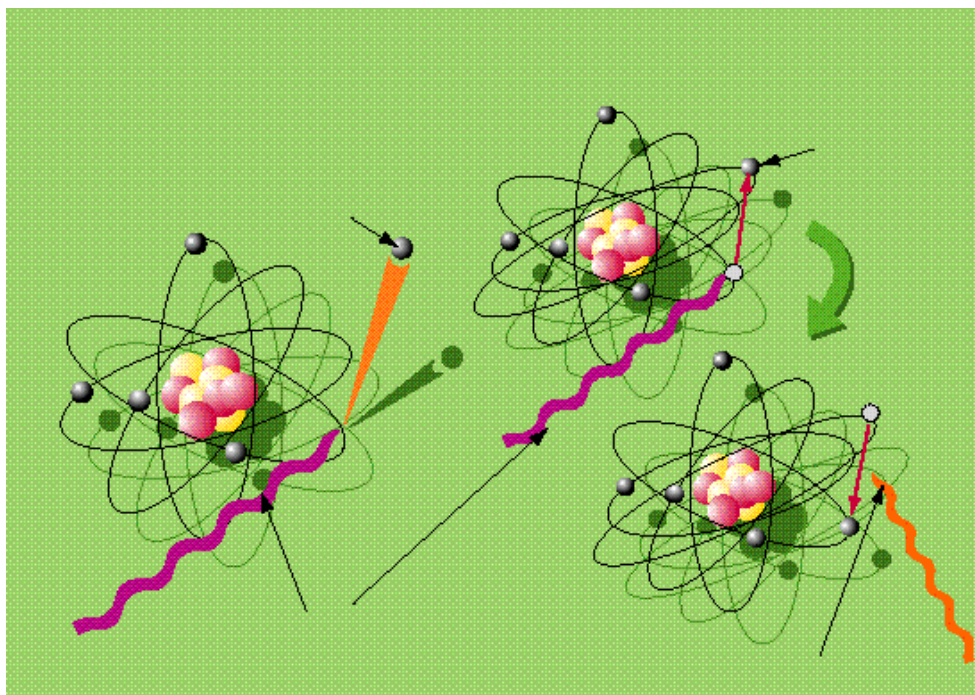


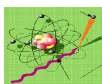
**Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”**

# LA PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI IONIZZANTI

**Corso d'informazione per i lavoratori operanti con le radiazioni ionizzanti**

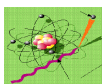
*A cura di: Ing. Aldo DELIA – Ing. Giovanni CALISESI*



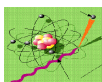


## INDICE

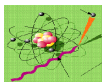
<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Premessa al D.lgs. 626/94 e al D.Lgs. 230/95 .....</b>	<b>5</b>
<b>2. IL CONCETTO DI RISCHIO .....</b>	<b>5</b>
<b>3. OPERATIVITA' .....</b>	<b>5</b>
<b>4. SERVIZIO DI PREVENZIONE E PROTEZIONE.....</b>	<b>6</b>
<b>5. RAPPRESENTANTE DEI LAVORATORI PER LA SICUREZZA.....</b>	<b>6</b>
<b>6. DIRITTI E DOVERI DEI LAVORATORI.....</b>	<b>7</b>
<b>6.1. Diritti.....</b>	<b>7</b>
<b>6.2. Doveri.....</b>	<b>7</b>
<b>7. OBBLIGHI DEI LAVORATORI.....</b>	<b>9</b>
<b>7.1. Estratto delle norme contenute nei D.lgvi 626/94, 758/94 e 242/96.....</b>	<b>9</b>
<b>8. NORMATIVA VIGENTE .....</b>	<b>11</b>
<b>8.1. Decreto del Presidente della Repubblica n° 185 del 13/02/1964.....</b>	<b>11</b>
<b>8.2. Decreto Ministeriale n° 449 del 13/07/1990.....</b>	<b>11</b>
<b>8.3. Decreto Legislativo del Governo n° 230 del 17/03/1995.....</b>	<b>11</b>
<b>9. GENERALITÀ' SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI .....</b>	<b>12</b>
<b>9.1. Costituzione dell'atomo.....</b>	<b>12</b>
<b>9.2. Ionizzazione .....</b>	<b>12</b>
<b>9.3. Isotopi .....</b>	<b>12</b>
<b>9.4. Cenni storici .....</b>	<b>14</b>
<b>9.5. Pericolosità delle particelle alfa (<math>\alpha</math>) .....</b>	<b>15</b>
<b>9.6. Pericolosità delle particelle beta (<math>\beta</math>) .....</b>	<b>15</b>
<b>9.7. Pericolosità delle particelle gamma (<math>\gamma</math>) .....</b>	<b>16</b>
<b>9.8. Rischio da irradiazione esterna .....</b>	<b>17</b>
<b>9.9. Radiazioni di natura ondulatoria (raggi <math>\gamma</math>) .....</b>	<b>17</b>
<b>10. SORGENTI DI RADIAZIONI .....</b>	<b>21</b>
<b>10.1. Un cenno all'atomo e ai decadimenti radioattivi.....</b>	<b>21</b>
<b>10.2. Le reazioni nucleari e la radioattività artificiale .....</b>	<b>26</b>
<b>10.3. Le macchine radiogene.....</b>	<b>27</b>
<b>11. LA PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI NELLA MATERIA .....</b>	<b>29</b>
<b>12. GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE.....</b>	<b>32</b>
<b>12.1. DEFINIZIONI.....</b>	<b>33</b>



<b>13. LE RADIAZIONI IONIZZANTI E L'AMBIENTE IN CUI VIVIAMO.....</b>	<b>37</b>
13.1. <i>Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti.....</i>	<i>37</i>
13.2. <i>Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti .....</i>	<i>39</i>
<b>14. PRINCIPALI RADIOELEMENTI IMPIEGATI NEI LABORATORI .....</b>	<b>41</b>
14.1. <i>Trizio (<math>H^3</math>) .....</i>	<i>41</i>
14.2. <i>Fosforo 32 (<math>P^{32}</math>) .....</i>	<i>41</i>
14.3. <i>Carbonio 14 (<math>C^{14}</math>).....</i>	<i>42</i>
14.4. <i>Iodio 131 (<math>I^{131}</math>) .....</i>	<i>42</i>
14.5. <i>Zolfo (<math>S^{35}</math>).....</i>	<i>42</i>
<b>15. IRRADIAZIONE ESTERNA E IRRADIAZIONE INTERNA.....</b>	<b>43</b>
15.1. <i>Rischio di contaminazione.....</i>	<i>43</i>
15.2. <i>Rischio di irradiazione esterna.....</i>	<i>44</i>
<b>16. RISCHIO DI IRRADIAZIONE ESTERNA IN CASO DI INCENDIO.....</b>	<b>44</b>
<b>17. EFFETTI SULL'UOMO DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI.....</b>	<b>46</b>
17.1. <i>Danni somatici deterministici.....</i>	<i>46</i>
17.2. <i>Danni somatici stocastici.....</i>	<i>50</i>
17.3. <i>Danni genetici stocastici.....</i>	<i>51</i>
17.4. <i>Irradiazione in utero (embrione e feto).....</i>	<i>53</i>
<b>18. I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA RADIOPROTEZIONE.....</b>	<b>60</b>
18.1. <i>Limiti per i lavoratori esposti: .....</i>	<i>61</i>
18.2. <i>Limiti i lavoratori non esposti e per il pubblico:.....</i>	<i>61</i>
<b>19. CLASSIFICAZIONE DEI LAVORATORI ESPOSTI, DEGLI APPRENDISTI E DEGLI STUDENTI.....</b>	<b>62</b>
19.1. <i>Accesso alla "zona controllata" ed alla "zona sorvegliata".....</i>	<i>66</i>
<b>20. CLASSIFICAZIONE DEI LABORATORI E DEI REPARTI .....</b>	<b>67</b>
20.1. <i>Tipi di laboratori e reparti .....</i>	<i>67</i>
20.2. <i>Laboratori di tipo 1 .....</i>	<i>67</i>
20.3. <i>Laboratori di tipo 2 .....</i>	<i>67</i>
20.4. <i>Laboratori di tipo 3 .....</i>	<i>67</i>
20.5. <i>Attività nei laboratori e reparti.....</i>	<i>67</i>
20.6. <i>Registro carico scarico elementi radioattivi.....</i>	<i>68</i>
<b>21. MODALITÀ' DI DETENZIONE DELLE SORGENTI .....</b>	<b>69</b>
21.1. <i>Manipolazione del materiale radioattivo .....</i>	<i>69</i>
21.2. <i>Procedure di decontaminazione .....</i>	<i>70</i>



21.3.	<i>Tecniche di decontaminazione</i> .....	71
21.3.1.	<i>Decontaminazione di superfici di lavoro ed attrezzature</i> .....	71
21.3.2.	<i>Decontaminazione individuale</i> .....	72
21.3.3.	<i>Decontaminazione della pelle</i> .....	72
21.3.4.	<i>Contaminazione di un'area estesa della pelle</i> .....	73
21.3.5.	<i>Contaminazione residua</i> .....	73
21.3.5.1.	<i>Mani</i> .....	73
21.3.5.2.	<i>Capelli</i> .....	74
21.3.5.3.	<i>Naso</i> .....	74
21.3.5.4.	<i>Bocca</i> .....	74
21.3.5.5.	<i>Occhi</i> .....	74
21.3.5.6.	<i>Ferite</i> .....	75
21.4.	<i>Gestione dei rifiuti radioattivi</i> .....	77
22.	<b>STRUMENTI OPERATIVI DI SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE</b> .....	77
23.	<b>NORME INTERNE DI RADIOPROTEZIONE</b> .....	79
24.	<b>LA DOSIMETRIA INDIVIDUALE</b> .....	79
24.1.	<i>Tecniche di dosimetria</i> .....	80
24.2.	<i>Film - dosimetria</i> .....	80
24.3.	<i>Penne dosimetriche tascabili</i> .....	80
24.4.	<i>Dosimetri a filo di quarzo</i> .....	80
24.5.	<i>Dosimetria a termoluminescenza</i> .....	81
24.5.1.	<i>Il servizio di dosimetria</i> .....	82
24.6.	<i>Norme procedurali per l'uso dei dosimetri</i> .....	84
25.	<b>GESTIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI</b> .....	84
25.1.	<i>Smaltimento dei rifiuti radioattivi</i> .....	85
25.2.	<i>Deposito rifiuti radioattivi</i> .....	85
25.3.	<i>Gestione quotidiana dei rifiuti radioattivi</i> .....	86
25.4.	<i>Contenitori dei rifiuti radioattivi</i> .....	86
25.5.	<i>Etichettatura dei contenitori dei rifiuti</i> .....	86
26.	<b>GLOSSARIO</b> .....	87



## 1. PREMESSA

### 1.1. Premessa al D.lgs. 626/94 e al D.Lgs. 230/95

La sicurezza sul lavoro era, prima della emanazione della 626, compito e responsabilità esclusiva del datore di lavoro.

Oggi, con l'introduzione di questa nuova norma, anche il lavoratore è chiamato a svolgere un ruolo attivo, con responsabilità, in caso di inadempienza, anche giuridica.

Il corso viene svolto in relazione a quanto previsto dal D.lgs 230/95, l'Art. 61, comma 3, lettera e) il quale (D. Lgs 17 marzo 1995 - Supplemento G.U. n° 136 del 23/06/1995) fa obbligo ai datori di lavoro, ai dirigenti e ai preposti di:

*rendere edotti i lavoratori, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione, in relazione alle mansioni cui essi sono addetti, dei rischi specifici cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne.*

## 2. IL CONCETTO DI RISCHIO

Il rischio professionale rappresenta la possibilità che un evento e/o una sostanza - ambiente possano produrre un danno o un effetto nocivo sull'uomo.

Il rischio può essere generico se comune a tutta la popolazione, specifico o professionale se limitato ad alcune categorie di soggetti esposti.

Vi è inoltre il rischio generico, aumentato da alcuni tipi di lavoro, che è assimilabile al rischio specifico (come per esempio il caso del fulmine che predilige gli elettricisti sui pali della luce).

La legge 626/94, al fine di assicurare ambienti di lavoro più sicuri prevede :

- ◇ una analisi dei rischi, con conseguente adozione di misure organizzative, tecniche e procedurali per poter programmare un adeguato piano di prevenzione
- ◇ l'adozione di mezzi di protezione individuale.

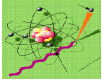
## 3. OPERATIVITA'

Le iniziative da portare avanti per creare una maggiore sicurezza all'interno del posto di lavoro sono, in ordine di priorità :

- \* Attuazione delle misure di prevenzione collettiva;
- \* Organizzazione di corsi, sia generici che specifici, sui rischi e piani di emergenza per l'informazione, la formazione dei lavoratori, la sorveglianza sanitaria, l'attuazione delle misure di prevenzione individuale,
- \* Rispetto delle norme igieniche, accurata manutenzione delle attrezzature usate, organizzazione di piani di emergenza in caso di disastro, nonché l'organizzazione del servizio di antincendio e di emergenza.

**Corso sulla protezione dalle radiazioni ionizzanti - Anno 2000**

**A cura degli Esperti Qualificati Dott. Ing. Aldo DELIA - Dott. Ing. Giovanni CALISESI**



#### **4. SERVIZIO DI PREVENZIONE E PROTEZIONE.**

Il Servizio di Prevenzione e Protezione è " l'insieme delle persone, sistemi e mezzi esterni o interni, finalizzati all'attività di prevenzione e protezione dai rischi professionali nell'azienda ovvero unità produttiva "

I compiti di questo servizio sono:

- ☐ L'individuazione delle fonti di rischio, il loro esame, individuando le più idonee misure per la sicurezza, nell'osservanza della normativa vigente.
- ☐ Lo studio e la elaborazione delle procedure di sicurezza.
- ☐ L'organizzare i programmi di informazione e formazione dei lavoratori.
- ☐ Il fornire ai lavoratori le informazioni sui rischi delle lavorazioni cui sono addetti .
- ☐ Il partecipare alle consultazioni in materia di tutela della salute e sicurezza.
- ☐ L'esprimere un parere di conformità al momento dell'acquisto di materiali e macchine alla normativa di sicurezza CEE anche in base all'ambiente in cui viene situato .

Tutto ciò è possibile solo attraverso le tempestive informazioni rese dal datore di lavoro al responsabile del servizio, sulla natura dei rischi, la descrizione degli impianti e dei processi di lavorazione, l'organizzazione del lavoro, i dati sugli infortuni e malattie professionali.

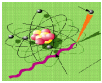
#### **5. RAPPRESENTANTE DEI LAVORATORI PER LA SICUREZZA.**

La figura del rappresentante dei lavoratori per la sicurezza è stata istituita con la normativa in esame.

La nomina spetta ai lavoratori e va comunicata, una volta effettuata, al Datore di Lavoro che ne prende atto.

I compiti di tale rappresentante sono:

- ☐ ha la facoltà del controllo dello svolgimento corretto dell'intera attività di prevenzione
- ☐ accede ai luoghi di lavoro anche se non di sua stretta pertinenza
- ☐ deve essere consultato preventivamente in relazione alla valutazione dei rischi
- ☐ deve essere consultato sui vari problemi relativi alla prevenzione
- ☐ deve avere accesso alle informazioni ed alla documentazione aziendale inerente la prevenzione e la tutela della salute dei lavoratori
- ☐ riceve una adeguata formazione
- ☐ partecipa alle riunioni periodiche sulla sicurezza
- ☐ avverte il Datore di Lavoro dei rischi individuati nel corso della sua attività



## **6. DIRITTI E DOVERI DEI LAVORATORI.**

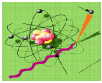
### **6.1. Diritti**

- I. Ricevere una informazione e formazione adeguata riguardo al posto di lavoro ed alle mansioni svolte.
- II. Controllare, tramite il rappresentante della sicurezza, l'applicazione delle misure di sicurezza e di protezione della salute.
- III. Avere informazioni sul significato degli accertamenti sanitari effettuati, sul loro esito e ricevere copia della cartella al momento della cessazione del lavoro (se richiesta).
- IV. Poter fare ricorso verso un giudizio di non idoneità espresso dal medico competente presso la ASL di zona.
- V. Abbandonare il posto di lavoro in caso di pericolo grave ed imminente.

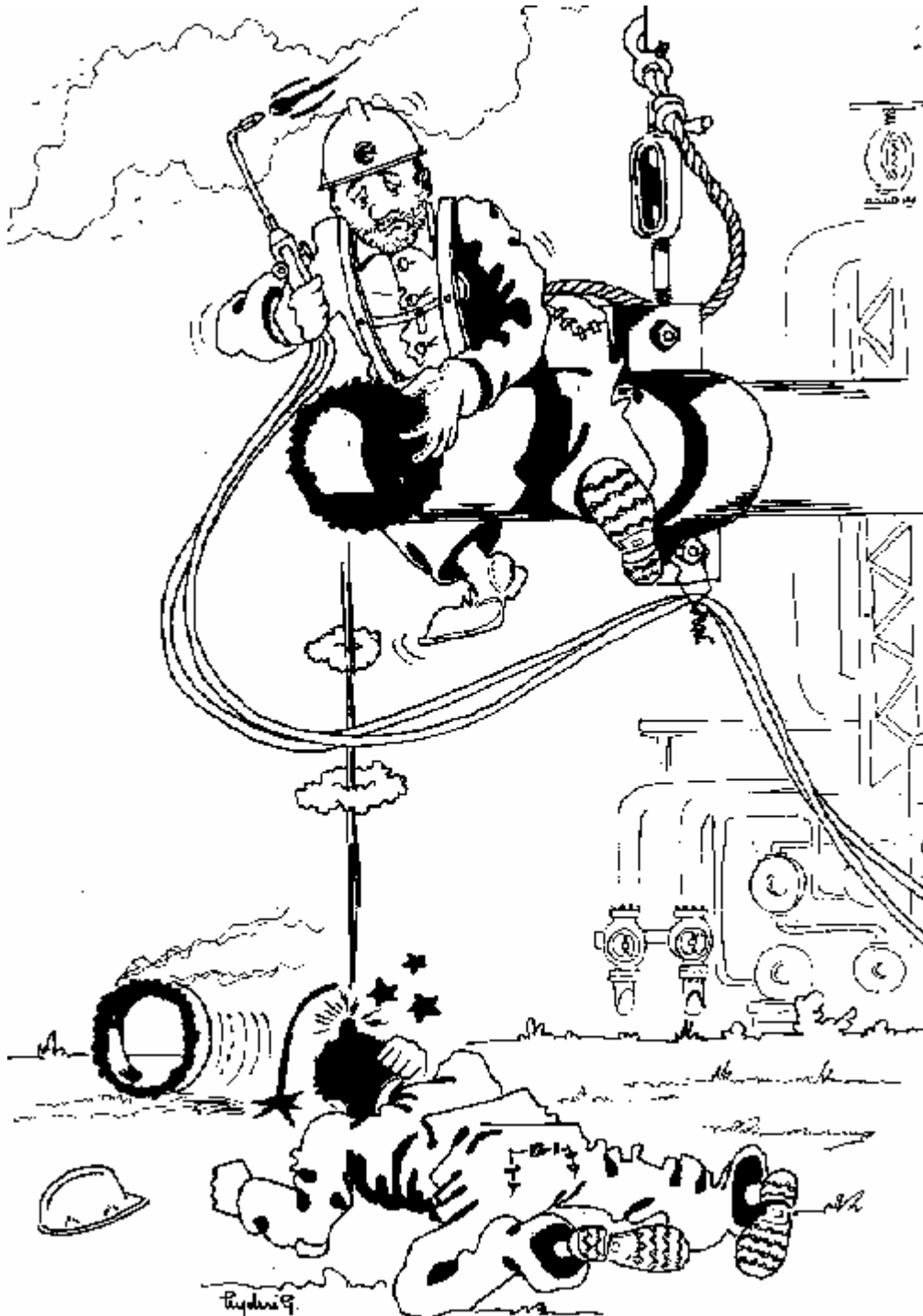
### **6.2. Doveri**

- I. Partecipare ai programmi di formazione ed addestramento.
- II. Prendersi cura della propria incolumità e salute utilizzando i mezzi di protezione e attenersi alle informazioni ricevute dal datore di lavoro e/o dai preposti.
- III. Eseguire gli accertamenti sanitari prescritti dal medico competente.
- IV. Usare nella maniera prescritta i macchinari, senza modificarne le misure di sicurezza
- V. Segnalare le eventuali condizioni di pericolo e, in caso di urgenza, eliminare o ridurre l'anomalia o il pericolo stesso. Dell'accaduto dovrà esserne informato anche il responsabile della sicurezza.
- VI. Segnalare al datore di lavoro, dirigente o preposto, eventuali anomalie accertate nel funzionamento dei dispositivi di protezione e di sicurezza.

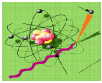




**E' DIRITTO E DOVERE DEL LAVORATORE PRENDERSI CURA DELLA  
PROPRIA E ALTRUI SALUTE E SICUREZZA MEDIANTE UN  
TEMPESTIVO INTERVENTO E LA SEGNALAZIONE DEI RISCHI  
PRESENTI.**





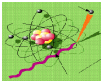


## **7. OBBLIGHI DEI LAVORATORI**

### **7.1. Estratto delle norme contenute nei D.lgvi 626/94, 758/94 e 242/96**

Le vigenti norme di legge pongono in capo ai lavoratori i seguenti obblighi in materia di sicurezza sul lavoro. In particolare:

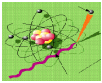
- 1) I lavoratori devono sottoporsi ai programmi di formazione o di addestramento previsti dall'Azienda, devono utilizzare le attrezzature di lavoro ed i dispositivi di protezione collettivi ed individuali messi a loro disposizione conformemente all'informazione alla formazione ricevute e all'addestramento eventualmente organizzato.
- 2) I lavoratori devono aver cura delle attrezzature di lavoro messe a loro disposizione all'Azienda, non devono apportarvi modifiche di loro iniziativa e devono segnalare immediatamente al dirigente responsabile ed al preposto qualsiasi difetto, inconveniente o anomalia da essi rilevato
- 3) I lavoratori devono aver cura dei dispositivi di protezione individuale messi a loro disposizione dall'Azienda, utilizzarli in modo appropriato e non devono apportarvi modifiche di loro iniziativa.
- 4) I lavoratori devono attenersi alle procedure aziendali in materia di riconsegna o conservazione dei dispositivi di protezione individuali e devono segnalare immediatamente al dirigente responsabile ed al preposto qualsiasi difetto o inconveniente da essi rilevato.
- 5) I lavoratori non devono assumere cibi e bevande o fumare nelle zone di lavoro ove sia stato segnalato rischio di esposizione ad agenti nocivi (biologici e cancerogeni),
- 6) I lavoratori in caso di esposizione anomala ad agenti nocivi (biologici e cancerogeni) devono abbandonare immediatamente le aree a rischio. I lavoratori incaricati per gli interventi di manutenzione, installazione ed altre operazioni necessarie che possono comportare una esposizione anomala ad agenti nocivi devono indossare idonei indumenti protettivi e dispositivi di protezione delle vie respiratorie nonché utilizzare i mezzi di protezione messi a loro disposizione dall'Azienda. In ogni caso l'uso di tali dispositivi di protezione deve essere limitato al minimo strettamente necessario.
- 7) I lavoratori devono segnalare immediatamente al dirigente responsabile o al preposto qualsiasi incidente relativo all'uso di agenti nocivi (biologici e cancerogeni).
- 8) I lavoratori devono prendersi cura della propria sicurezza e della propria salute e di quella delle altre persone presenti sul posto di lavoro su cui possono ricadere gli effetti delle loro azioni o omissioni, conformemente alla formazione ricevuta, alle istruzioni e ai mezzi forniti dall'Azienda.
- 9) I lavoratori osservano le disposizioni aziendali e le istruzioni impartite dai dirigenti responsabili e dai preposti ai fini della protezione collettiva e individuale ed utilizzano correttamente i macchinari, le apparecchiature, gli utensili, le sostanze e i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto e le altre attrezzature di lavoro nonché i dispositivi di sicurezza messi a disposizione dell'Azienda
- 10) I lavoratori segnalano immediatamente al dirigente responsabile o al preposto ed eventualmente al rappresentante dei lavoratori per la sicurezza le deficienze o l'uso improprio di qualsiasi macchinario, apparecchiatura, utensile, sostanza o preparato pericoloso, mezzo di



- 11) trasporto, attrezzatura di lavoro, dispositivo di sicurezza, nonché le altre eventuali condizioni' di pericolo conosciute, adoperandosi direttamente, in caso di urgenza, nell'ambito delle loro competenze e possibilità, per eliminare o ridurre tali deficienze o pericoli.
- 11) I lavoratori non compiono di propria iniziativa operazioni o manovre che non sono di loro competenza ovvero che possono compromettere la sicurezza propria o di altri lavoratori
- 12) I lavoratori non rimuovono o modificano senza autorizzazione i dispositivi di sicurezza o di segnalazione o di controllo.
- 13) I lavoratori devono sottoporsi ai controlli sanitari preventivi e periodici previsti nei loro confronti dall'Azienda
- 14) I lavoratori contribuiscono in accordo con i dirigenti responsabili ed i preposti all'adempimento di tutti gli obblighi imposti dall'autorità competente o comunque necessari per tutelare la sicurezza e la salute dei lavoratori durante il lavoro.
- 15) I lavoratori non possono, se non per giustificato motivo, rifiutare la designazione per l'attuazione delle misure di primo intervento e lotta antincendio, di evacuazione in caso di pericolo grave e immediato, di salvataggio, di pronto soccorso e, comunque, di gestione dell'emergenza.

*Si precisa che per l'inosservanza degli obblighi di cui ai punti 1), 2), 3), 4), 7), 9), 10), 11), 12), 13), 14) e 15) è previsto l'arresto fino ad un mese o l'ammenda, da lire quattrocentomila a un milione e duecentomila; per l'inosservanza degli obblighi di cui al punto 6) è previsto l'arresto fino a quindici giorni o l'ammenda da lire duecentomila a lire seicentomila; per l'inosservanza degli obblighi di cui al punto 5) è prevista la sanzione amministrativa pecuniaria da lire centomila a lire trecentomila.*

Indipendentemente dalle responsabilità di natura penale sopra indicate, il mancato rispetto degli obblighi dei lavoratori in tema di sicurezza costituisce comunque infrazione disciplinare che, come tale, può essere perseguita dai regolamenti interni aziendali.



## **8. NORMATIVA VIGENTE**

### **8.1. Decreto del Presidente della Repubblica n° 185 del 13/02/1964**

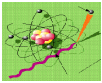
Sicurezza degli impianti e protezione sanitaria dei lavoratori e delle popolazioni contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti derivanti dall'impiego pacifico dell'energia nucleare.

### **8.2. Decreto Ministeriale n° 449 del 13/07/1990**

Regolamento concernente le modalità di tenuta della documentazione relativa alla sorveglianza fisica e medica della protezione dalle radiazioni ionizzanti e la sorveglianza medica dei lavoratori esposti al rischio di tali radiazioni.

### **8.3. Decreto Legislativo del Governo n° 230 del 17/03/1995**

Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti.



## 9. GENERALITÀ' SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Il termine *radiazione* viene abitualmente usato per descrivere fenomeni apparentemente assai diversi tra loro quali:

- l'emissione di luce da una lampada
- di calore da una fiamma,
- l'emissione di particelle elementari da una sorgente radioattiva
- etc.

caratteristica comune a tutti questi tipi di emissione è il trasporto di energia nello spazio. Questa energia viene ceduta quando la radiazione è assorbita nella materia e ciò lo si può constatare osservando un aumento della temperatura in prossimità del punto in cui è avvenuto l'assorbimento.

Si tenga però presente che l'aumento di temperatura non è l'unico effetto prodotto dall'assorbimento di radiazione nella materia:

- la luce può impressionare un lastra fotografica,
- il calore può generare un incendio,
- le radiazioni ionizzanti possono danneggiare l'organismo umano,
- etc.

La materia è costituita dalla combinazione di un certo numero di elementi raggruppati e classificati, con il loro simbolo chimico, nel *sistema periodico*. Con il termine **atomo** si indica la più piccola quantità di materia che conserva le caratteristiche fisiche di un elemento.

### 9.1. Costituzione dell'atomo

L'atomo è costituito da:

- un *nucleo* centrale nel quale è praticamente concentrata tutta la massa di un atomo costituito a sua volta da *neutroni* (elettricamente neutri) e *protoni* (carichi positivamente)
- *elettroni* (con carica elettrica negativa) che circondano il nucleo.

### 9.2. Ionizzazione

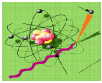
Con tale termine si indica il processo per il quale un atomo o una molecola possono perdere o acquistare elettroni, dando luogo a particelle che prendono il nome di **ioni** per il fatto che si pongono in movimento quando sottoposti all'azione di un campo elettrico.

Uno ione è elettricamente carico e la sua carica è appunto determinata dal numero di elettroni perduti o acquistati nel processo di ionizzazione.

### 9.3. Isotopi

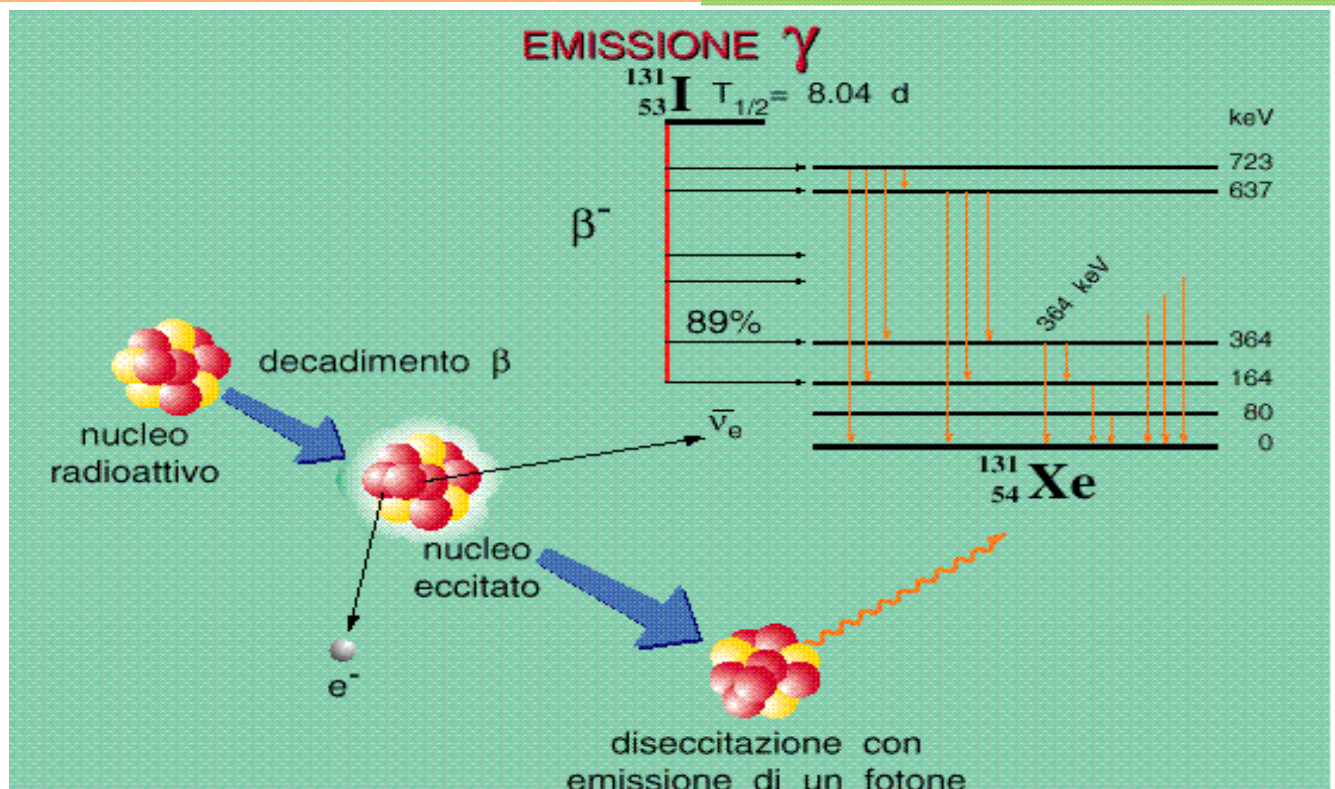
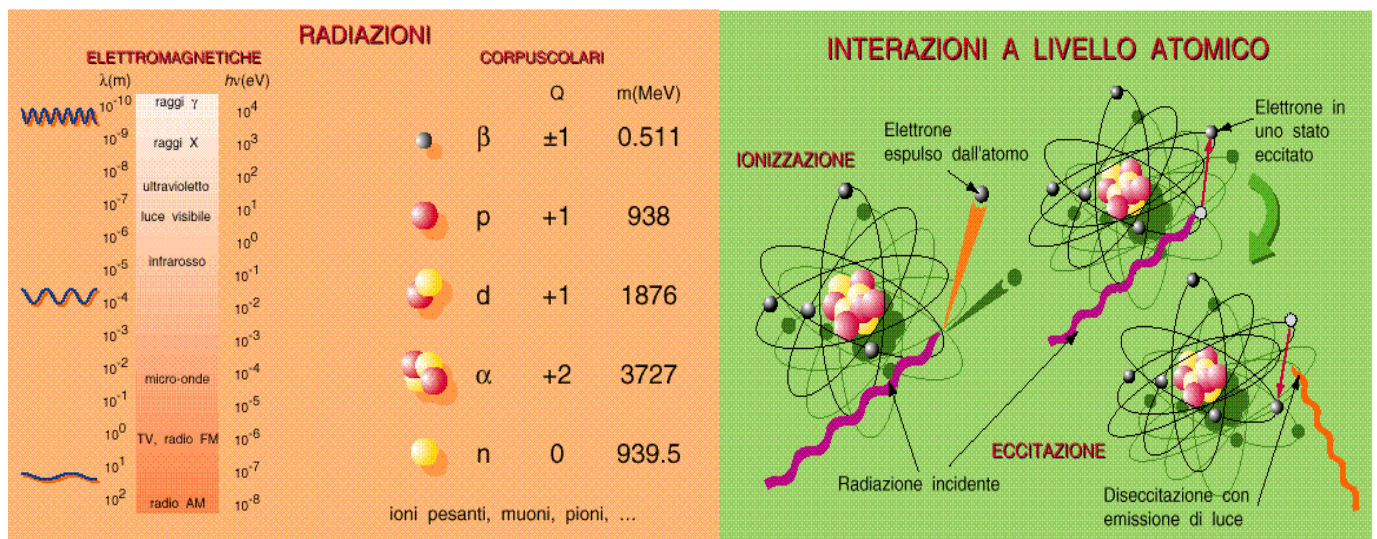
A tutt'oggi sono noti più di 100 elementi, ognuno dei quali caratterizzato dal suo *numero atomico*  $Z$  (numero di protoni del nucleo o di elettroni che circondano il nucleo).

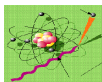




Si tenga presente che la struttura di un atomo è tale per cui accanto al numero atomico  $Z$  vi è il *numero di massa*  $A$  (numero totale di protoni e di neutroni nel nucleo) ed è stato trovato che esistono elementi con lo stesso numero atomico  $Z$  ma con diversi numeri di massa  $A$ ; ad essi si dà il nome di **isotopi**. Gli isotopi di un dato elemento, che possono essere più di uno, hanno lo stesso numero di protoni e differiscono per il numero dei neutroni contenuti nel nucleo.

Tra essi alcuni sono **instabili**, vale a dire che possiedono un eccesso di energia che viene liberata sotto forma di particelle e/o di radiazioni elettromagnetiche con un processo di decadimento o di disintegrazione che prende il nome di **radioattività**.





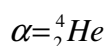
#### 9.4. Cenni storici

La radioattività naturale fu osservata per la prima volta nel 1896 da Henri Becquerel quando, studiando il fenomeno della fluorescenza di alcuni sali di uranio, si accorse casualmente che i suoi campioni emettevano una radiazione penetrante simile a quella descritta un anno prima da Roentgen nei suoi lavori sulle scariche dei gas.

Col tempo si chiarì che gli atomi che emettono radiazioni sono instabili e decadono con formazione di nuovi atomi.

L'impiego di campi magnetici ha permesso di stabilire che esistono tre distinti tipi di radiazioni naturali indicate come radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

*Particelle  $\alpha$ :* hanno carica positiva e sono costituite da atomi di elio:



Le particelle  $\alpha$  provenienti da atomi radioattivi naturali sono emesse con velocità dell'ordine di 1/20 di quelle della luce. Hanno quindi energie cinetiche considerevoli generalmente comprese tra 4 e 9 MeV. Interagendo con la materia questa energia viene perduta per ionizzazione e per eccitazione degli atomi della sostanza attraversata.

La ionizzazione avviene di solito con due meccanismi, che comportano entrambi la formazione di una coppia di ioni, purché l'energia ceduta all'elettrone sia maggiore dell'energia di legame (*potenziale di ionizzazione*):

- a) collisione diretta con un elettrone orbitale;
- b) interazione dei campi elettrostatici della particella  $\alpha$  e degli elettroni orbitali del mezzo assorbente.

L'interazione delle particelle  $\alpha$  con la materia non gassosa è estremamente ridotta, e ciò è dovuto a due diverse componenti:

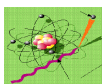
- elettrostatica: dovuta alla carica positiva doppia
- meccanica: dovuta alla massa considerevole su scala atomica.

Di conseguenza una particella  $\alpha$  è in grado di formare un numero (*ionizzazione specifica*) elevato di coppie di ioni per unità di percorso.

*Particelle  $\beta$ :* hanno carica negativa e sono costituite da elettroni, provenienti dal nucleo.

*Radiazione  $\gamma$ :* non subisce deflessioni in campo magnetico, non è costituita da particelle, ma è di natura elettromagnetica, come la luce visibile.

Va rilevato che le radiazioni citate –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – sono emesse dal nucleo degli atomi radioattivi ed i fenomeni di decadimento sono legati alle proprietà nucleari delle singole specie di nuclei instabili, indicate con il termine: *nuclidi radioattivi* o *radionuclidi*.



Talora sono emesse anche radiazioni di origine atomica anziché nucleare, dovute cioè a fenomeni inerenti gli elettroni orbitali: questo è il caso dei raggi X.

E' stato osservato che il decadimento di tutte le sostanze radioattive avviene seguendo la stessa legge di decadimento esponenziale caratterizzata da una costante di decadimento a sua volta legata al concetto di vita media e tempo di dimezzamento (tempo necessario affinché l'attività iniziale di un dato radioisotopo si riduca a metà).

Ciascun atomo radioattivo ha il suo proprio schema di decadimento, caratterizzato da due grandezze:

- 1.) la vita media,
- 2.) l'energia emessa.

L'identificazione di un particolare radioisotopo dipenderà pertanto dalle queste due grandezze; alcuni radioisotipi hanno vita media pressoché uguale ma energia di emissione diversa, mentre altri hanno energie di emissione molto vicine ma vite medie notevolmente diverse.

### 9.5. Pericolosità delle particelle alfa ( $\alpha$ )

Ogni volta che si considera il rischio di un danno biologico conseguente a radiazioni, si distinguono due modi di interazione con la materia vivente:

- l'*irradiazione esterna*  
e
- la *contaminazione interna*.

Data la scarsa penetrazione in sostanze dense, le particelle  $\alpha$  emesse da radioelementi, anche quelle di più alta energia, riescono al massimo a penetrare lo strato morto della pelle del corpo umano e non raggiungono il tessuto vivente: **non** si ha quindi rischio di danno biologico.

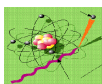
Dal punto di vista della contaminazione interna, di contro, esse rappresentano un grave pericolo. La scarsa penetrazione nelle sostanze dense, ora che la sorgente è circondata da tessuto vivente, conduce infatti ad una concentrazione dell'effetto intorno al punto di origine delle particelle, dal momento che tutta l'energia delle  $\alpha$  verrà assorbita in quella zona e non potrà distribuirsi su una massa più grande del tessuto: se quindi una sorgente  $\alpha$  si fissa in un organo, piccolo ma essenziale, del corpo umano, quest'ultimo potrà esserne gravemente danneggiato.

### 9.6. Pericolosità delle particelle beta ( $\beta$ )

Le particelle  $\beta$  non sono altro che elettroni, emessi da nuclei instabili di atomi radioattivi. Questa emissione può constare sia di elettroni negativi, che di elettroni positivi (*positroni*).

Con il termine di *particella  $\beta$*  si comprendono gli uni e gli altri, in quanto differiscono solo per il segno della carica, avendo la stessa massa di riposo.





Contrariamente a quanto avviene per le particelle  $\alpha$ , le particelle  $\beta$  non sono emesse con energia ben determinata, ma con uno spettro continuo fino ad un valore massimo di energia caratteristico per ogni radioisotopo.

Anche gli elettroni interagiscono con la materia fino a perdere tutta la loro energia cinetica, con un meccanismo:

- sia di *urto* con gli elettroni orbitali, che porta a perdita di energia per eccitazione e ionizzazione
- sia di *interazione* con i nuclei che porta all'emissione di raggi X (quest'ultimo processo è prevalente quando i raggi  $\beta$  hanno energia elevate).

Poiché le particelle  $\beta$  hanno una massa molto più piccola rispetto a quelle  $\alpha$ , le interazioni risultano meno frequenti e quindi la ionizzazione specifica dei raggi  $\beta$  è più bassa, a parità di altre condizioni, di quelle delle particelle  $\alpha$ .

In aria i valori della ionizzazione specifica variano per gli elettroni (particelle  $\beta$ ) da  $60 \div 7.000$  coppie ioni/cm, contro le corrispondenti  $10.000 \div 70.000$  coppie ioni/cm, per le particelle  $\alpha$ .

Il potere frenante degli elettroni diminuisce quando il numero atomico  $Z$  della sostanza assorbente aumenta, in relazione al fatto che le sostanze ad elevato  $Z$  hanno una minore densità di elettroni: questi elettroni, inoltre, sono legati più strettamente al nucleo. Tuttavia al crescere di  $Z$ , aumenta anche la diffusione multipla degli elettroni, che comporta un aumento del loro percorso effettivo nella sostanza. Questi due processi tendono a bilanciarsi uno con l'altro così che la densità di una sostanza dà un'idea della sua bontà ad arrestare gli elettroni. E' anzi prassi comune esprimere la penetrazione degli elettroni in  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ; in tal caso esso risulta pressoché indipendente dal tipo di sostanza assorbente.

L'assorbimento delle particelle  $\beta$  da parte della materia segue una legge con decadimento esponenziale caratterizzata dal coefficiente di assorbimento di massa  $\mu$ .

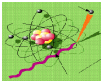
I raggi  $\beta$  possono costituire un rischio di danno biologico per quanto concerne sia l'irradiazione esterna sia la contaminazione interna.

### 9.7. Pericolosità delle particelle gamma ( $\gamma$ )

Le radiazioni  $\gamma$  sono, al contrario delle precedenti, neutre e si propagano con velocità pari a quella della luce  $c = 3 \times 10^8$  m/s. Risultano **molto** penetranti tanto che sono necessari diversi centimetri di piombo per assorbirle.

I raggi  $\gamma$ , proprio per la loro natura (fotoni generati nei fenomeni di rilassamento del nucleo) non subiscono deviazioni per effetto del campo magnetico in quanto si tratta di radiazione non di natura corpuscolare ma elettromagnetica, come i raggi X. Così come questi ultimi, vengono anche denominati “fotoni” in quanto portatori di un “quanto” di radiazione elettromagnetica o di luce.

I rischi di danno biologico e genetico conseguenti a radiazioni X e  $\gamma$ , sono strettamente connessi con l'elevata capacità di penetrazione che esse hanno in aria e nel tessuto vivente.



Dal punto di vista della contaminazione interna, il fatto che i raggi X e  $\gamma$  siano molto penetranti rappresenta un elemento positivo, nel senso che l'energia ceduta al tessuto risulta distribuita su un più vasto volume, con conseguente minore pericolosità.

Dal punto di vista dell'irraggiamento, al contrario, i fotoni presentano un alto grado di pericolosità per due distinti motivi:

- ❑ Perché penetrano, con scarso assorbimento, fino a distanze abbastanza grandi dalla sorgente, conseguente necessità di schermature molto più consistenti di quelle usate per le particelle  $\alpha$  e  $\beta$ ;
- ❑ Perché, data la facilità con cui attraversano la materia, i tessuti più radiosensibili del corpo risultano esposti ai campi di radiazione esterna, con una possibilità di danno biologico che non rimane limitata, come nel caso delle particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , ai tessuti superficiali meno importanti.

E' inoltre importante considerare la discontinuità dell'interazione dei fotoni con la materia, per la quale, al contrario di quanto avviene con le particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , non si ha una scia continua di ioni secondari lungo la traiettoria. Ne segue che, per un organo di piccole dimensioni, il danno biologico provocato da una radiazione  $\gamma$  sarà minore di quello provocato da una sorgente uguale di radiazioni  $\alpha$  e  $\beta$ .

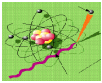
## 9.8. Rischio da irradiazione esterna

Si distinguono due processi:

- a) **radiazione diretta:** per superare lo strato morto della pelle e giungere fino ai tessuti viventi, sono sufficienti  $\beta$  con energie sopra i 70 keV. Tuttavia i raggi  $\beta$  diretti non vengono considerati come un grave pericolo in quanto possono essere facilmente schermati (basta uno spessore di alluminio).
- b) **radiazione di frenamento:** le schermature previste per fermare i fasci diretti di particelle  $\beta$  ad energia relativamente alta possono costituire un pericolo per i raggi X emessi conseguentemente. Si può tuttavia ridurre l'entità della radiazione di frenamento scegliendo sostanze schermanti a basso numero atomico Z. Anche nel caso della contaminazione interna le particelle  $\beta$  non sono considerate troppo pericolose; quanto meno non rappresentano un pericolo così grave come le  $\alpha$ . Questo in quanto, pur avendo una maggiore penetrazione nel tessuto vivente, hanno una ionizzazione specifica di gran lunga minore: *l'energia perduta viene quindi distribuita su una massa di tessuto molto più elevata, con minore rischio di danno biologico.*

## 9.9. Radiazioni di natura ondulatoria (raggi $\gamma$ )

Un'onda può definirsi come una perturbazione, associata ad un trasporto di energia, che si trasmette a velocità finita. La perturbazione può essere sia di tipo meccanico (onde acustiche) sia di tipo elettromagnetico (luce visibile). In ogni caso è possibile definire la lunghezza d'onda  $\lambda$ , che è la distanza minima tra i punti nei quali la perturbazione si ripete con identiche caratteristiche.



Indicando con  $v$  la velocità di propagazione dell'onda, il rapporto  $\lambda/v$  indicherà il tempo necessario perché una certa perturbazione si ripeta in un punto fissato (periodo di perturbazione), ed il suo inverso darà  $v/\lambda = \nu$  (frequenza di perturbazione) il numero di onde che passano per il punto fissato nell'unità di tempo.

Dal punto di vista radioprotezionistico solo i raggi X e  $\gamma$  presentano possibilità di pericolo. Esse hanno lunghezze d'onda molto piccole (indicate in Angstrom  $\text{\AA}$ ), variabili tra  $100$  e  $10^{-3} \text{\AA}$ , vale a dire tra  $10^{-6}$  e  $10^{-11} \text{ cm}$ .

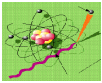
La loro natura è prevalentemente ondulatoria, ovvero non è possibile definire una massa di riposo.

I raggi  $\gamma$  sono emessi dal nucleo di un atomo radioattivo. Si è trovato che la maggior parte degli atomi che decadono emettendo una particella  $\beta$  emettono anche quanti  $\gamma$ ; ugualmente anche molti atomi che decadono emettendo una particella  $\alpha$  emettono quanti  $\gamma$ . Anche per i nuclei possono considerarsi vari stati energetici e l'emissione di una particella  $\alpha$  o  $\beta$  porta il nucleo ad uno stato eccitato, dal quale ritorna allo stato fondamentale emettendo energia elettromagnetica, sotto forma di uno o più raggi  $\gamma$ . Nelle sostanze radioattive  $\gamma$ -emittenti, il decadimento può verificarsi, oltre che direttamente, anche sotto forma di conversione interna, processo che si verifica quando il nucleo eccitato emette un quanto  $\gamma$ , che a sua volta espelle un elettrone delle orbite interne, con conseguenti transizioni degli elettroni esterni (che emetteranno raggi X di fluorescenza).

La ionizzazione prodotta dai raggi X e  $\gamma$  è per lo più secondaria: cioè, nella interazione tra raggi X o  $\gamma$  e materia si ha una limitata produzione diretta di ioni primari che, interagendo a loro volta con la materia, producono la maggior parte delle ionizzazioni che si verificano in una sostanza.

I tre metodi principali con i quali i raggi X e  $\gamma$  interagiscono con la materia sono: l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e la creazione di coppie.

- **Effetto fotoelettrico:** un fotone colpisce un elettrone orbitale di un atomo cedendogli tutta la sua energia. Di essa, parte viene impiegata per rimuovere l'elettrone dalla sua orbita atomica (ionizzazione primaria) e parte si trova sotto forma di energia cinetica dell'elettrone che provocherà nel mezzo la ionizzazione secondaria. Al crescere della frequenza, e quindi dell'energia incidente, l'effetto fotoelettrico interessa anche gli elettroni dei livelli interni, la cui rimozione comporta una serie di transizioni degli elettroni esterni, con emissione dei raggi X caratteristici di fluorescenza che a loro volta potranno provocare l'effetto fotoelettrico sugli elettroni delle orbite esterne dello stesso atomo.
- **Effetto Compton:** si verifica quando un fotone interagendo con un elettrone cede ad esso solo una parte della sua energia: l'elettrone viene diffuso con un certo angolo rispetto alla direzione iniziale del fotone e quest'ultimo (fotone Compton) viene anch'esso diffuso con un certo angolo e con una energia minore di quella iniziale.
- **Creazione di coppie:** interazione nella quale un fotone cede tutta la sua energia per formare due particelle (un elettrone ed un positrone), scomparendo. Tale fenomeno



avviene in prossimità del nucleo. Sia l'elettrone che il positrone perdono poi la loro energia cinetica per ionizzazione degli atomi della sostanza ed il positrone, infine, interagisce con un elettrone della stessa, con un processo detto di *annichilazione*, nel quale si ha una trasformazione inversa di quella iniziale: le due particelle scompaiono e la loro massa si trasforma in 2 fotoni di 0,51 MeV ciascuno, emessi in direzioni opposte, che potranno a loro volta interagire con la sostanza, per effetto Compton o fotoelettrico.

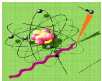
I rischi di danno biologico e genetico conseguenti a radiazioni X e  $\gamma$  sono strettamente connessi con l'elevata capacità di penetrazione che esse hanno in aria e nel tessuto vivente.

Dal punto di vista della contaminazione interna, il fatto che i raggi X e  $\gamma$  siano molto penetranti rappresenta un elemento positivo, analogamente a quanto visto per le particelle  $\beta$ , nel senso che l'energia ceduta al tessuto risulta distribuita su un più vasto volume, con conseguente minore pericolosità.

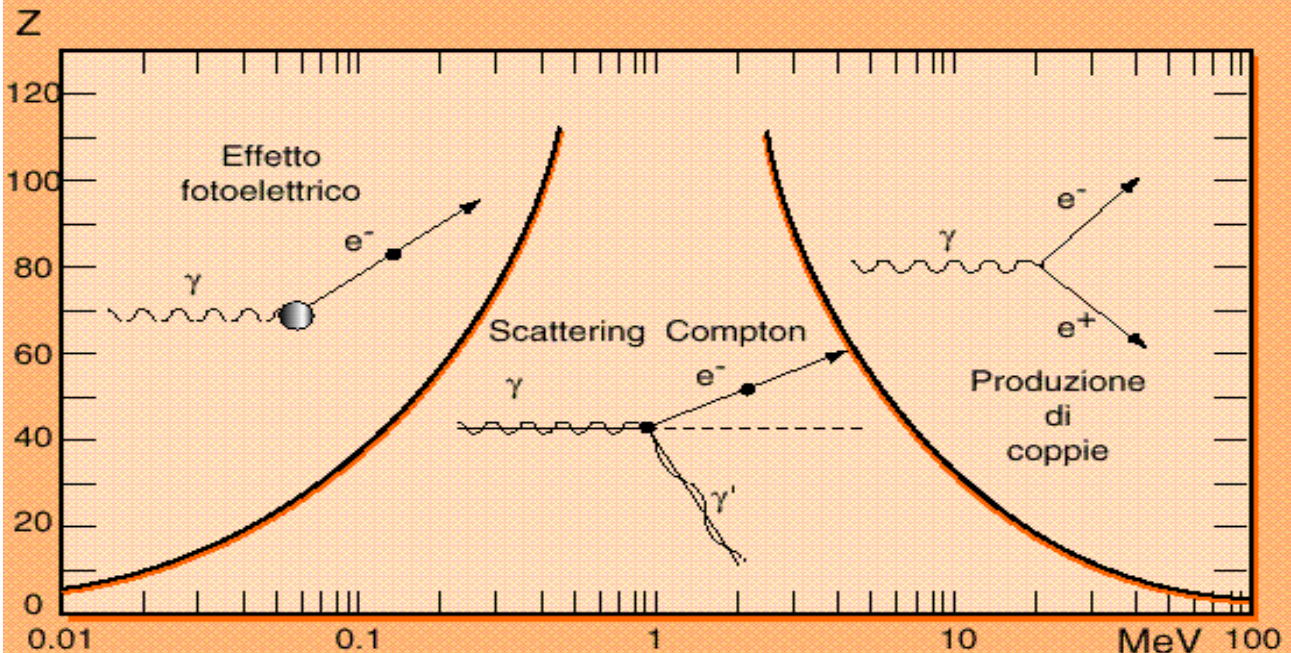
Dal punto di vista dell'irraggiamento, al contrario, i fotoni presentano un alto grado di pericolosità per due motivi:

- perché penetrano, con scarso assorbimento, fino a distanze abbastanza grandi dalla sorgente, con conseguente necessità di schermature molto più consistenti di quelle usate per le altre particelle;
- perché, data la facilità con cui attraversano la materia, i tessuti più radiosensibili del corpo risultano esposti ai campi di radiazione esterna, con una possibilità di danno biologico che non rimane limitata ai tessuti superficiali meno importanti.





## INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

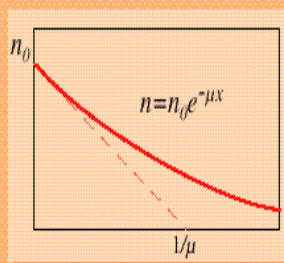
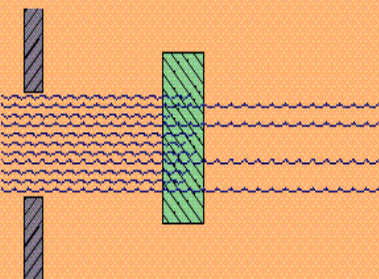


### INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

Nel caso di fasci collimati di fotoni monoenergetici incidenti su un assorbitore di spessore  $dx$  e densità  $\rho$ , si ha:

$$dn = n\mu dx = n\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho dx)$$

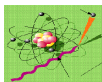
con  $\mu/\rho$  coefficiente di attenuazione massico



### INTERAZIONE DELLE PARTICELLE CARICHE LEGGERE

**Lunghezza di radiazione:** distanza percorsa in media da un elettrone per irraggiare una frazione  $1/e$  della sua energia.  
**Energia critica:** energia alla quale le perdite per collisione e le perdite per irraggiamento si equivalgono  $\epsilon_0 \approx 800/Z$  (MeV)

sostanza	$X_0$ (g cm <sup>-2</sup> )	$\epsilon_0$ (MeV) ( $\delta=0$ )
Aria	37.1	81
Acqua	36.4	90
Fe	13.9	23.3
Pb	6.4	7.5



## 10. SORGENTI DI RADIAZIONI

### 10.1. Un cenno all'atomo e ai decadimenti radioattivi

L'atomo è la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche dell'elemento stesso e nel contempo è la principale sorgente di radiazioni sia elettromagnetiche che corpuscolari.

Esso è composto di un nucleo e di particelle più leggere, gli elettroni, di carica elettrica negativa che gli ruotano intorno in orbite energeticamente ben definite. Un elettrone, ricevendo energia, può passare da orbite interne ad orbite esterne, oppure uscire dall'atomo. Nel primo caso l'atomo risulta eccitato, nel secondo ionizzato.

A sua volta il nucleo è costituito da protoni aventi carica elettrica positiva e neutroni, elettricamente neutri. Protoni e neutroni hanno una massa all'incirca 1835 volte maggiore degli elettroni. Il numero di protoni determina l'elemento cui l'atomo appartiene: un atomo di idrogeno ha un solo protone, un atomo di ossigeno ne ha 8, un atomo di uranio ne ha 92.

Ogni atomo ha lo stesso numero di protoni e di elettroni e risulta elettricamente neutro. Gli atomi di uno stesso elemento, pur avendo lo stesso numero di protoni, possono avere diverso numero di neutroni, dando origine ai diversi "isotopi". Essi sono identificati dal numero totale di particelle presenti nel nucleo. Ad esempio, l'uranio (simbolo U) ha vari isotopi:

U-238, U-235, U-233. L'uranio-238 ha 92 protoni e  $(238-92)=146$  neutroni; l'uranio-235 ha sempre 92 protoni, ma  $(235-92)=143$  neutroni; l'uranio-233 ha 92 protoni e 141 neutroni.

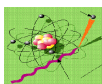
L'elemento più semplice esistente in natura, l'idrogeno (H-1) ha due isotopi, il deuterio (H-2) e il tritio (H-3). Quest'ultimo è radioattivo ed emette particelle beta negative.

In generale un isotopo il cui simbolo sia Y è caratterizzato dal numero atomico Z, pari al numero dei protoni e degli elettroni, dal numero di massa A, pari al numero totale di particelle presenti nel nucleo e dal numero  $N = A - Z$  pari al numero di neutroni. Se l'isotopo è radioattivo, si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.

Numerosi elementi esistenti in natura sono costituiti da atomi i cui nuclei sono energeticamente instabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma). I nuclei in parola si dicono radioattivi e la menzionata emissione di radiazione viene detta decadimento radioattivo o radioattività. Il fenomeno è regolato dalla fondamentale legge del decadimento radioattivo secondo la quale, per ogni radionuclide, deve trascorrere un tempo caratteristico (tempo di dimezzamento) affinché il numero di nuclei radioattivi presenti si dimezzi. Il tempo di dimezzamento può essere compreso tra le frazioni di secondo e i milioni di anni.

Le radiazioni alfa e gamma emesse nei decadimenti radioattivi hanno una energia ben definita. La radiazione beta ha invece uno spettro energetico continuo, che si estende fino ad una energia massima tipica di ciascun radioisotopo.





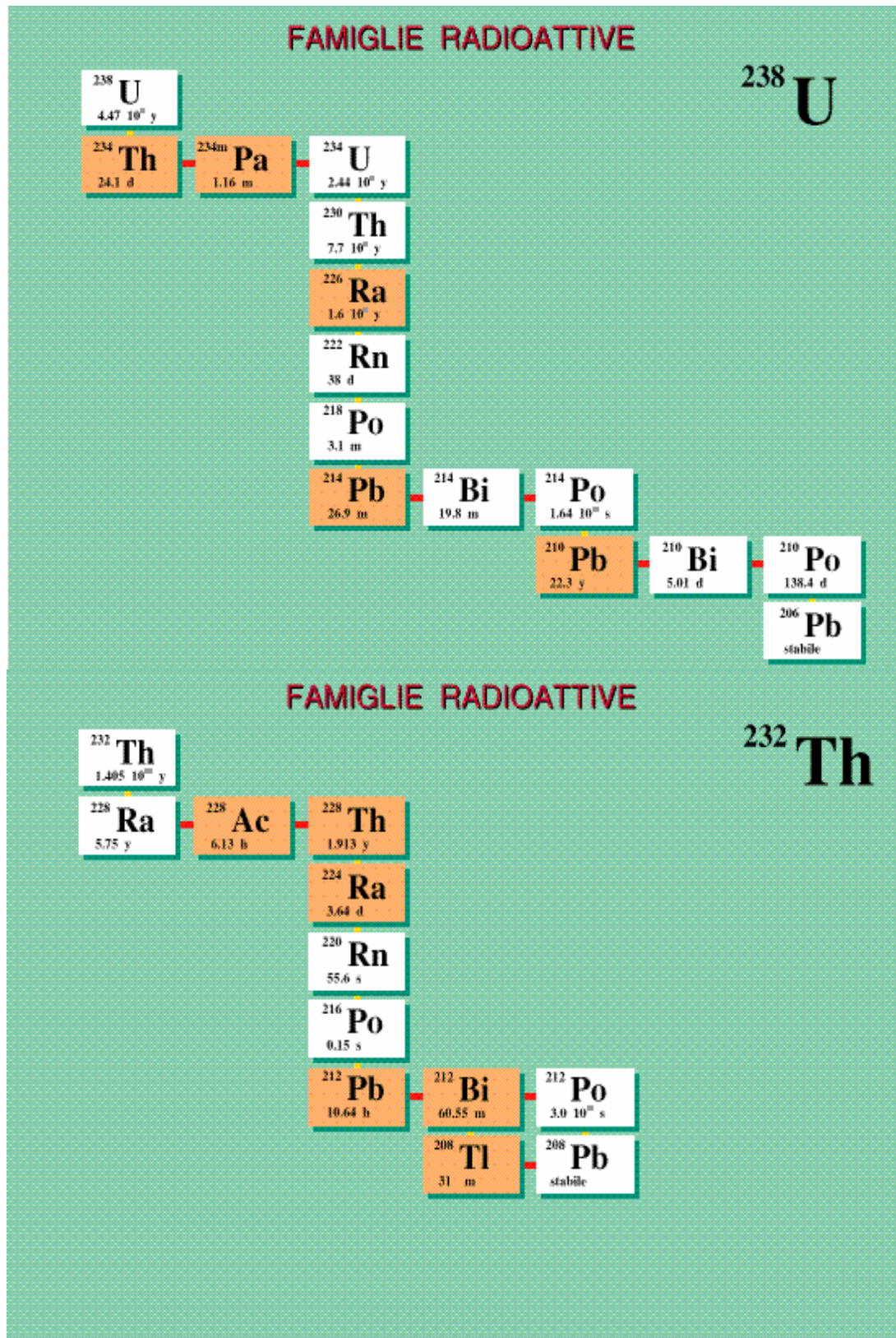
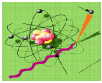
L'energia media di questi elettroni è dell'ordine di un terzo dell'energia massima. Ciascun radionuclide si caratterizza per il tipo e l'energia delle particelle emesse e per il tempo di dimezzamento.

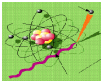
Il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo in una data quantità di materiale radioattivo costituisce la sua attività. L'attività si misura in Becquerel (Bq): 1 Bq=1 disintegrazione al secondo. Quando l'attività è riferita alla contaminazione presente su una superficie, si suole esprimerla in Bq per unità di area ( $\text{Bq.cm}^{-2}$ ), quando invece è riferita a un volume, si pensi ad esempio alla contaminazione dell'aria, si parla di Bq per unità di volume ( $\text{Bq.cm}^{-3}$ ). Allo stesso modo, nel caso di contaminazione di matrici (per es. alimenti, suolo, etc.), ci si riferisce all'attività per unità di massa ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ).

### RADIONUCLIDI NATURALI

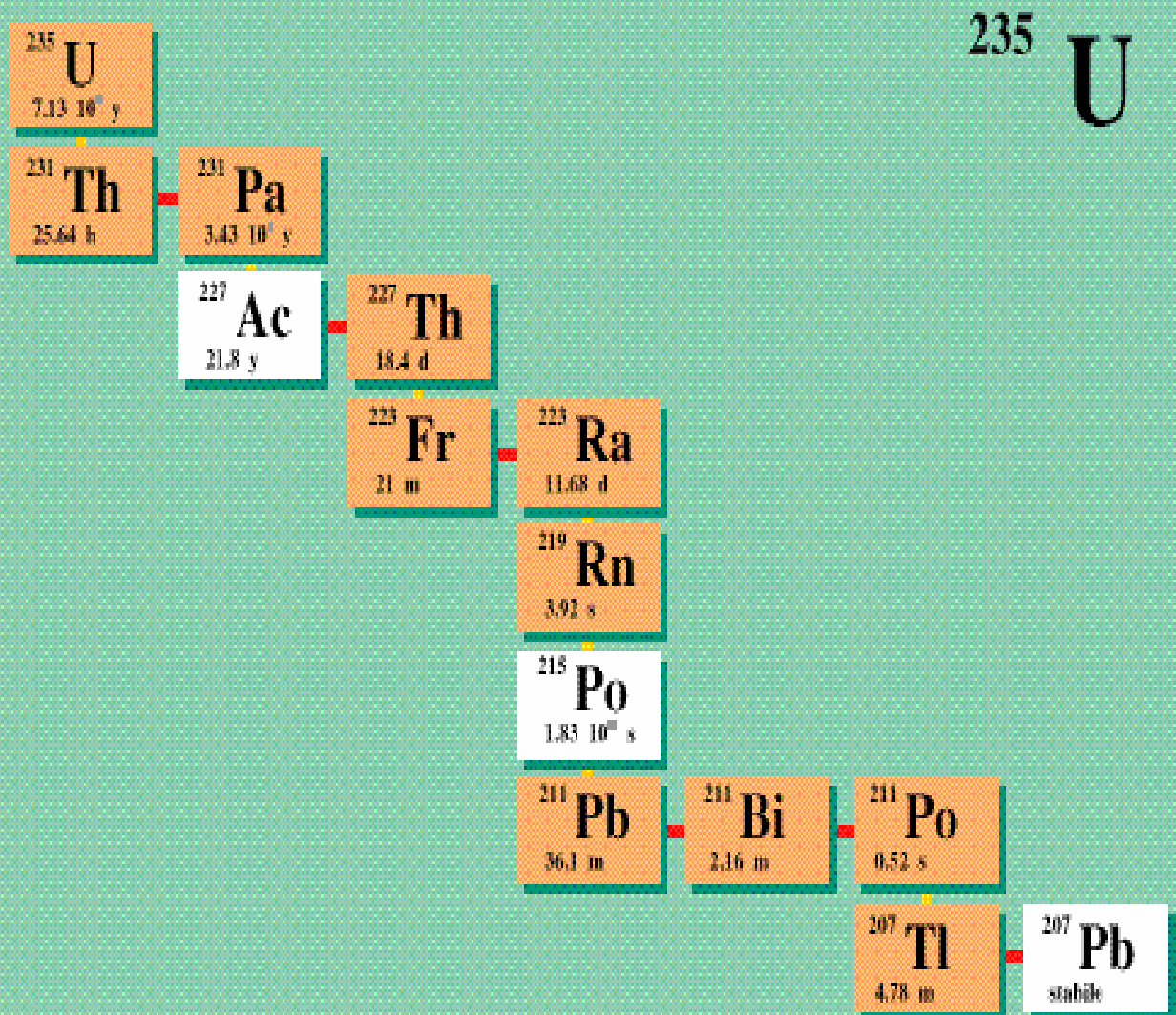
isotopo	abbondanza (%)	t dimezzamento (y)	transizioni
$^{40}_{19}\text{K}$	0.0119	$1.2 \cdot 10^9$	$\beta^-$ , EC, $\gamma$
$^{87}_{37}\text{Rb}$	27.85	$6 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$
$^{115}_{49}\text{In}$	95.77	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta^-$
$^{130}_{52}\text{Te}$	34.49	$1 \cdot 10^{21}$	produzione di $^{130}_{54}\text{Xe}$
$^{138}_{57}\text{La}$	0.089	$2 \cdot 10^{11}$	$\beta^-$ , EC
$^{144}_{60}\text{Nd}$	23.9	$1 \cdot 10^{15}$	$\alpha$
$^{147}_{62}\text{Sm}$	15.07	$1.4 \cdot 10^{11}$	$\alpha$
$^{176}_{71}\text{Lu}$	2.6	$7.5 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$ , $\gamma$
$^{187}_{75}\text{Re}$	62.93	$4 \cdot 10^{12}$	$\beta^-$
$^{232}_{90}\text{Th}$	100	$1.4 \cdot 10^{10}$	$\alpha$
$^{235}_{92}\text{U}$	0.715	$7.1 \cdot 10^8$	$\alpha$
$^{238}_{92}\text{U}$	99.28	$4.5 \cdot 10^9$	$\alpha$

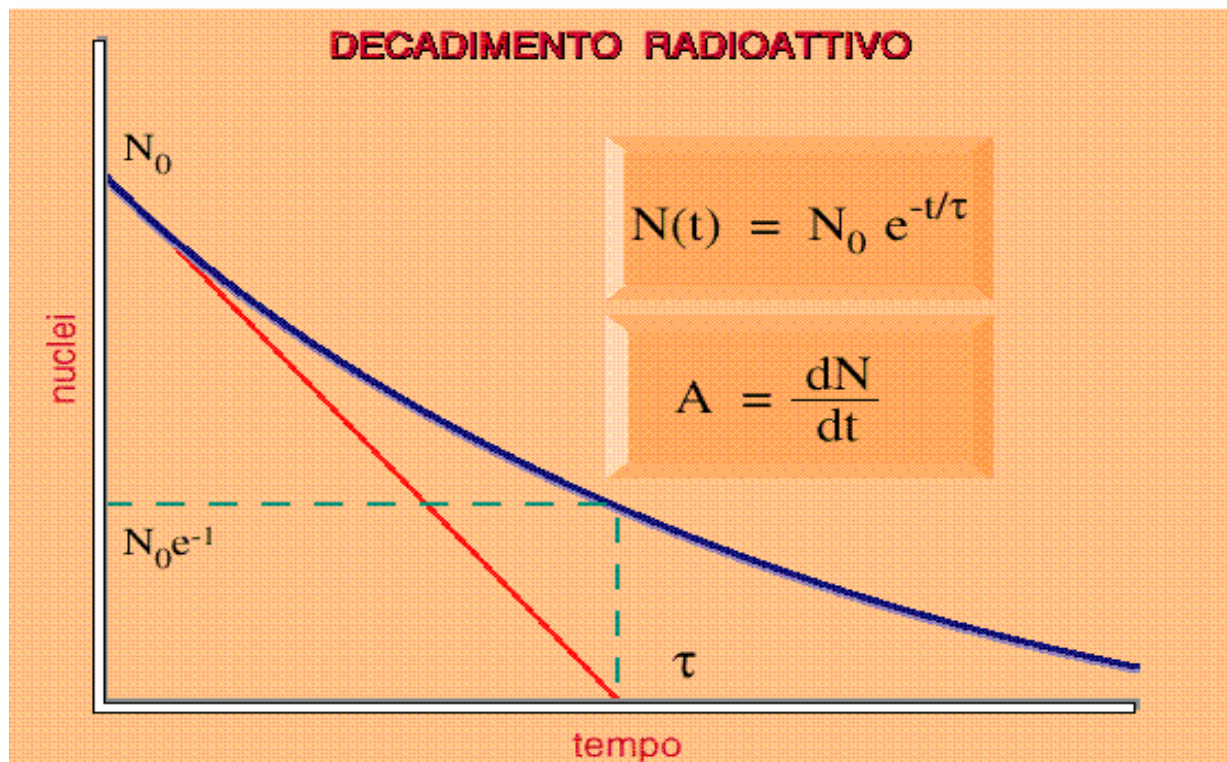
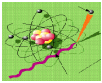






## FAMIGLIE RADIOATTIVE





### ATTIVITA' DI UNA SORGENTE RADIOATTIVA

L'attività di una sorgente radioattiva è il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

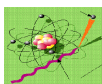
L'unità di misura è il bequerel (Bq), pari ad una disintegrazione al secondo.

In precedenza si usava il curie (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

L'attività decade col tempo con legge esponenziale:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$



## 10.2. Le reazioni nucleari e la radioattività artificiale

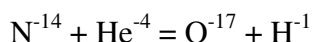
Il fenomeno della radioattività può essere indotto artificialmente in nuclei stabili attraverso le reazioni nucleari. In questo caso si parla di radioattività artificiale per distinguerla dalla precedente, detta invece naturale.

Si ha una reazione nucleare quando delle particelle (ad esempio protoni, neutroni, alfa) colpiscono i nuclei della materia: il nucleo colpito (nucleo bersaglio) assorbe la particella lanciata ("proiettile") ed in generale ne emette un'altra o più di una, restando modificato nella sua struttura.

Si possono considerare come particolari reazioni nucleari anche i casi in cui la particella emessa è la stessa incidente, ovvero quando si verifica una semplice deviazione di questa (fenomeno detto "diffusione"): il nucleo non cambia natura, ma tutt'al più si eccita (diffusione anelastica) o resta inalterato (diffusione elastica). Sino al 1932 i soli proiettili di cui si disponeva per produrre reazioni nucleari erano le particelle alfa emesse dai nuclei radioattivi. L'invenzione degli acceleratori di particelle ha enormemente allargato le possibilità: attualmente si possono accelerare i nuclei di quasi tutti gli atomi esistenti in natura e di molti di quelli prodotti artificialmente. A seconda della massa degli ioni accelerati, si dispone di acceleratori di ioni leggeri (ad esempio protoni, deutoni, alfa) o di ioni pesanti (ad esempio carbonio, ossigeno, fluoro, rame etc.). Anche i bersagli (cioè i nuclei bersaglio) che si utilizzano possono essere i più svariati, con produzione di una amplissima gamma di nuclei radioattivi (radioisotopi artificiali, prodotti dall'uomo).

Una determinata reazione nucleare si può indicare con una simbologia simile a quella usata in chimica.

L'interpretazione, ad esempio, della reazione:



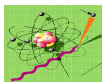
è la seguente: una particella alfa (cioè un nucleo di elio  $\text{He}^{-4}$ ) colpendo un nucleo di azoto N-14 produce, in seguito a reazione nucleare, un nucleo di ossigeno  $\text{O}^{-17}$  con emissione di un protone  $\text{H}^{-1}$ . Spesso si usa una notazione abbreviata, e l'equazione precedente si scrive  $\text{N}^{-14}(\text{alfa},\text{p})\text{O}^{-17}$ , ove il primo simbolo denota il nucleo bombardato, la prima lettera tra parentesi il proiettile, la seconda lettera la particella espulsa e l'ultimo simbolo il nucleo residuo.

Quando quest'ultimo si trova in uno stato energeticamente instabile, si ha il fenomeno della radioattività, in questo caso artificiale.

Per ottenere effettivamente reazioni nucleari con particelle proiettile di tipo carico come protoni o alfa è necessario che esse abbiano energia tanto maggiore quanto maggiore è il numero atomico Z del nucleo bombardato. Ciò si spiega in quanto avendo tali particelle carica positiva, tendono ad essere respinte dalla carica positiva dei nuclei. Diverso è il caso per proiettili come i neutroni, privi di carica: essi possono produrre reazioni su nuclei di qualsiasi numero atomico Z, anche se la loro energia è molto modesta (frazione di eV).

Come abbiamo già visto, i neutroni non sono emessi in fenomeni radioattivi, ma possono esserlo in fenomeni di fissione spontanea (cioè nella rottura di un nucleo in due frammenti) a partire





da elementi molto pesanti (un esempio è il californio-252). Sorgenti anche molto intense di neutroni si ottengono mediante reazioni nucleari prodotte da acceleratori di particelle. Tipiche reazioni per produrre neutroni utilizzano come proiettile il nucleo di un isotopo dell'idrogeno, cioè il deuterio (simbolo  $H^2$  oppure d) e come bersaglio il deuterio stesso o l'altro isotopo dell'idrogeno, cioè il tritio ( $H^3$ ).

Simbolicamente tali reazioni si scrivono:  $H^2(d, n) He^3$ ;  $H^3(d, n) He^4$ . In seguito alle due reazioni si formano rispettivamente elio<sup>-3</sup> o elio<sup>-4</sup>.

Sorgenti portatili di neutroni da laboratorio si ottengono facilmente da reazioni nucleari prodotte da particelle alfa o raggi gamma emessi da radioisotopi e fatti interagire con nuclei leggeri bersaglio come boro o berillio. Una tipica sorgente di neutroni si ottiene miscelando polvere di Am-241 (radioisotopo che emette particelle alfa) con polvere di Berillio. I neutroni emessi hanno uno spettro energetico che si estende fino a circa 10 MeV, con un'energia media di 4,5 MeV.

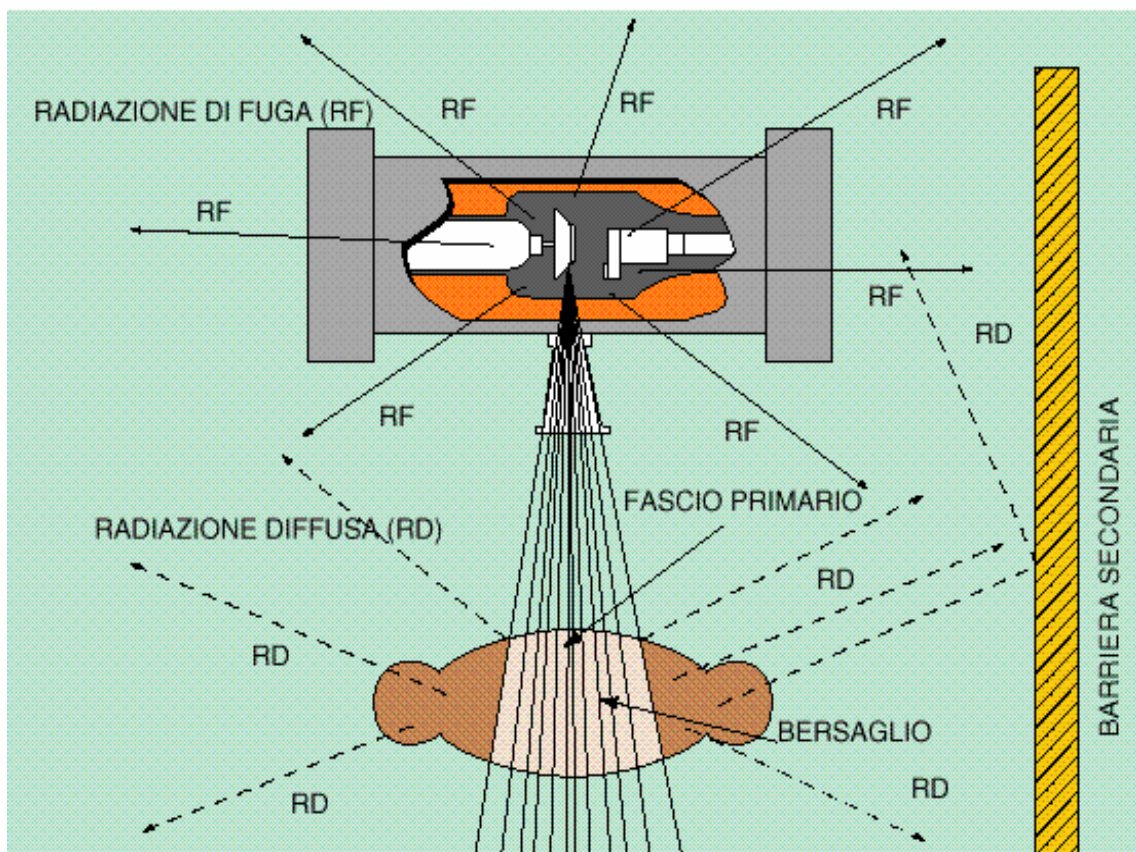
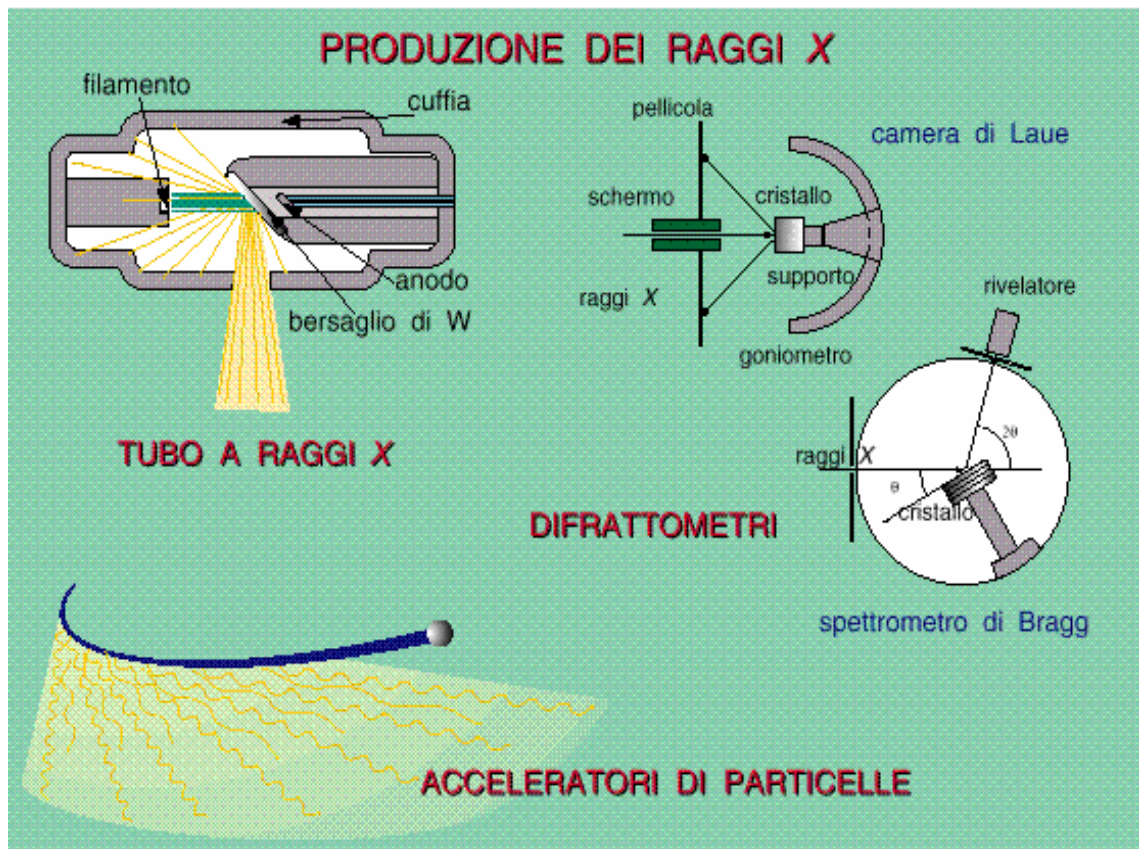
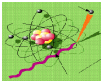
### 10.3. Le macchine radiogene

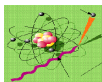
Sorgenti di radiazioni sono infine le macchine radiogene, apparecchiature nelle quali vengono accelerate particelle elementari cariche, che interagendo su opportuni bersagli producono i fasci di radiazione da utilizzare. L'esempio più noto è quello dei tubi a raggi X, utilizzati nella radiologia medica, ove fasci di raggi X vengono appunto prodotti per interazione degli elettroni accelerati con idonei bersagli di elevato numero atomico.

Un tubo a raggi X non è altro che un piccolo acceleratore di elettroni, emessi da un filamento riscaldato e poi accelerati verso l'anodo per mezzo di una differenza di potenziale. Questi elettroni quando arrivano sul bersaglio (l'anodo) danno origine a raggi X di frenamento, di tutte le energie fino a quella degli elettroni incidenti, cui si aggiungono i raggi X caratteristici dell'elemento di cui è costituito l'anodo, di energia ben definita.

Naturalmente, sono macchine radiogene anche gli acceleratori di particelle, ben noti per la loro utilizzazione nella ricerca scientifica.

Le macchine radiogene, come si descriverà più avanti, vengono abitualmente impiegate in un gran numero di applicazioni della vita civile, che non riguardano soltanto le applicazioni mediche e scientifiche, ma anche altri settori, tra i quali principalmente quello industriale.





## 11. LA PENETRAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI NELLA MATERIA

Le radiazioni ionizzanti propagandosi nello spazio possono incontrare materia vivente e non, con la quale interagiscono. I meccanismi di interazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali.

Le particelle alfa si caratterizzano per la produzione di una elevata densità di ionizzazione lungo le loro tracce. Il percorso nella materia di queste particelle è quindi sempre assai modesto. Esse possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria oppure da un semplice foglio di carta. Solo se hanno una energia maggiore di circa 7 MeV sono in grado di superare lo spessore di 70 micrometri di tessuto e possono quindi raggiungere lo strato germinativo della cute. Non sono pertanto molto pericolose fin quando la sorgente resta al di fuori dell'organismo umano (irradiazione esterna).

Diventano invece estremamente pericolose, una volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), in quanto tutta la loro energia viene allora ceduta agli organi e tessuti interni del corpo umano.

E' utile menzionare che materiali isolanti come la plastiche, quando sono colpiti da radiazioni densamente ionizzanti come le particelle alfa, diventano nel tempo fragili e pulverulenti (danno da radiazioni nei materiali). Questo problema è da tenere presente, ad esempio, nelle sorgenti alfa emittenti da laboratorio, che devono essere periodicamente sostituite, a causa del danneggiamento subito dal sottile strato di plastica con il quale vengono sigillate.

Anche le particelle beta e gli elettroni hanno una modesta capacità di penetrazione nella materia, ma i loro percorsi sono comunque assai maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti. Elettroni da 1 MeV sono arrestati in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua. Solo particelle con energie maggiori di 70 keV riescono a raggiungere lo strato germinativo della cute.

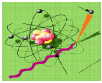
Quando si vogliono schermare le sorgenti di elettroni, conviene introdurre un primo strato di materiale leggero, al fine di ridurre l'intensità dei raggi X di frenamento che queste particelle producono, cui far seguire un successivo strato di materiale pesante per ridurre i raggi X prodotti.

Per gli elettroni positivi (positroni) bisogna inoltre tener presente la produzione di fotoni da 0,511 MeV nei processi di annichilazione.

Nel caso delle radiazioni indirettamente ionizzanti (le principali sono i raggi X e gamma e i neutroni), la cui penetrazione nella materia è assai maggiore delle particelle cariche, in considerazione della tipologia delle loro interazioni, non ha senso parlare di percorso nella materia.

Con i raggi X e gamma si suole piuttosto far riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali il loro numero viene ridotto alla metà. Detti spessori, quando espressi in g.cm<sup>-2</sup>, ovvero come prodotto dello spessore espresso in cm per la densità in g.cm<sup>-3</sup>, risultano grosso modo indipendenti dal tipo di materiale preso in considerazione, almeno per energie dei fotoni non troppo modeste. Ad esempio, a 1 MeV gli spessori di dimezzamento in acqua, calcestruzzo e





piombo sono rispettivamente di 10 cm, 4,5 cm e 0,9 cm, mentre espressi in  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  risultano tra loro confrontabili (circa  $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ).

Per attenuare efficacemente le radiazioni X e gamma si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica, quali piombo, tungsteno, uranio, etc.

I neutroni, infine, perdono energia tramite le interazioni con i nuclei degli atomi dei materiali attraversati. In un ampio intervallo di energia, tra circa 10 keV e 10 MeV, il principale meccanismo di interazione con la materia biologica è la diffusione elastica con la messa in moto di nuclei di rinculo, principalmente i protoni dell'idrogeno. A energie molto basse, al di sotto di 0,5 eV, prevalgono invece le reazioni di cattura da parte dei nuclei, con emissione di raggi gamma e altre particelle.

Trattandosi di radiazioni indirettamente ionizzanti, anche per i neutroni si può tentare di introdurre in linea di principio lo spessore di dimezzamento, sebbene molto meno significativo che nel caso dei fotoni. A titolo esemplificativo, si menziona che in acqua, a neutroni da 3 MeV e 10 MeV, corrispondono SEV dell'ordine di 3 cm e 14 cm rispettivamente.

Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, quali acqua, paraffina, calcestruzzo, etc.

### INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI CON LA MATERIA

Schema comparativo in un solido

NEUTRONE

PARTICELLA  $\alpha$  O DEUTONE

ELETTRONI

FOTONI

coppia vacanza-interstiziale

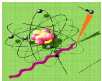
### POTERE FRENANTE

Rappresenta la perdita media di energia per unità di percorso causata dalle collisioni anelastiche delle particelle cariche con i costituenti del mezzo attraversato ed in seguito ad irraggiamento.

$$S = - \frac{dE}{dx} = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}}$$

L'energia persa per ionizzazione ed eccitazione viene assorbita nel mezzo in prossimità della traccia dell'elettrone, quella irraggiata viene invece assorbita anche a notevole distanza

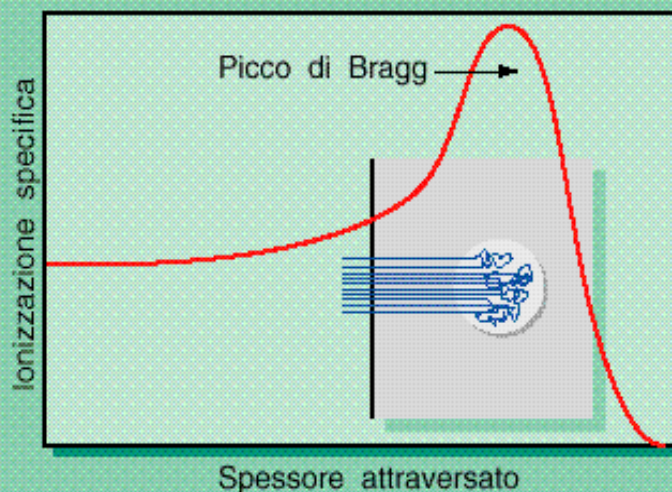




## INTERAZIONE DELLE PARTICELLE CARICHE PESANTI

La quasi esclusiva causa di perdita di energia sono le collisioni anelastiche (ionizzazione, eccitazione).

La ionizzazione specifica si mantiene quasi costante sino in prossimità del punto di arresto della particella, dove dà origine al cosiddetto "picco di Bragg".



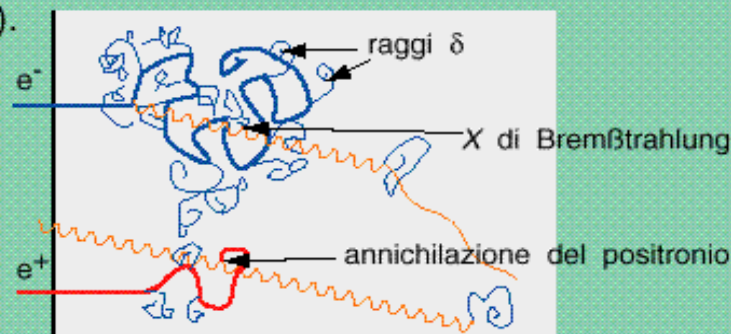
La ionizzazione aumenta al diminuire della velocità

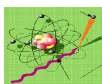
## INTERAZIONE DELLE PARTICELLE CARICHE LEGGERE (ELETTRONI, POSITRONI)

Le perdite di energia si devono sia a collisioni anelastiche (ionizzazione, eccitazione), che all'irraggiamento ed alle collisioni elastiche.

Le perdite per irraggiamento sono predominanti per energie  $E \gg mc^2$

Il percorso delle particelle è tortuoso e vengono generati elettroni secondari, a loro volta capaci di produrre ionizzazione (raggi  $\delta$ ).





## 12. GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorchè si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare il danno subito dai tessuti biologici è in relazione all'energia assorbita per unità di massa. Di questa circostanza si tiene conto per mezzo della grandezza dose assorbita,  $D$ , definita come il quoziente tra l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento di volume e la massa di materia contenuta in tale elemento di volume.

La dose assorbita si misura in Gray, Gy. Un Gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ ).

Spesso vi è interesse a riferirsi alla dose assorbita per unità di tempo, ovvero all'intensità o rateo di dose assorbita, che si misura in  $\text{Gy.s}^{-1}$ , o più usualmente in qualche sottomultiplo di questa unità, come ad es. il  $\text{mGy.h}^{-1}$

Il grado di rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è però solo proporzionale alla dose assorbita, ma è anche strettamente legato al tipo di radiazione incidente e alla radiosensibilità dei vari organi e tessuti irradiati.

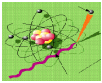
Per tenere conto della diversa pericolosità delle radiazioni incidenti, si introduce il cosiddetto fattore di qualità della radiazione,  $Q$ . Si tratta di un parametro che tiene conto della pericolosità delle varie radiazioni rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un  $Q$  uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita in tessuto,  $D$ , per il fattore di qualità,  $Q$ , prende il nome di equivalente di dose,  $H$  ( $H=QD$ ). L'equivalente di dose si misura in sievert (Sv).

Nel caso dei fotoni e degli elettroni,  $Q=1$ , e la dose assorbita di un Gray corrisponde all'equivalente di dose di un Sv. Sulla base degli esiti degli studi epidemiologici e di radiobiologia si è osservato che, a parità di dose assorbita, le particelle alfa con energia di alcuni MeV, producono un danno biologico 20 volte maggiore dei fotoni. Pertanto, a queste particelle, è stato assegnato un  $Q=20$ . Anche i neutroni sono più pericolosi dei fotoni e si assume per essi un  $Q$  compreso tra 3 e 11 a seconda della loro energia. Quando la dose è dovuta a radiazioni di diverse energie, si introduce un valor medio del fattore di qualità che viene detto fattore di qualità efficace ( $Q_{\text{eff}}$ ).

Si parla di intensità o rateo di equivalente di dose quando ci si riferisce all'equivalente di dose ricevuto nell'unità di tempo. Esso si esprime in  $\text{Sv.s}^{-1}$  o più comunemente in  $\text{mSv.h}^{-1}$ .

Per tenere conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici, si introduce l'equivalente di dose efficace,  $E$ , somma degli equivalenti di dose medi nei diversi organi e tessuti ( $HT$ ), ciascuno moltiplicato per un fattore di ponderazione ( $wT$ ), che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi irraggiati. I valori assunti nel D.Lgs. 230/95 per i  $wT$  sono i seguenti: 0,25 per le gonadi, 0,15 per le mammelle, 0,12 per il midollo osseo rosso e per il polmone, 0,03 per la tiroide e per le superfici ossee, 0,06 per ciascuno dei rimanenti 5 organi più irraggiati.

Anche l'equivalente di dose efficace, per mezzo del quale si stabiliscono i limiti per le esposizioni non omogenee, si esprime in Sv.



Nel caso dell'introduzione di radionuclidi nel corpo umano (contaminazione interna) si deve tener conto che l'irraggiamento si protrarrà fin quando il radionuclide introdotto è presente nel corpo. La dose ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di equivalente di dose impegnata. Nel caso dei lavoratori il calcolo della dose impegnata viene effettuato cautelativamente su un periodo di 50 anni a partire dall'introduzione.

## 12.1. DEFINIZIONI

- a) radiazioni ionizzanti: radiazioni costituite da fotoni o da particelle aventi la capacità di determinare, direttamente o indirettamente, la formazione di ioni.
- b) attività (A): quoziente di  $dN$  diviso per  $dt$ , in cui  $dN$  è il numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide che si producono durante il tempo  $dt$ .
- c) Becquerel (Bq): nome speciale dell'unità S.I. di attività

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

I fattori di conversione da utilizzare quando l'attività è espressa in curie (Ci) sono i seguenti:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7027 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

- d) dose assorbita (D): quoziente di  $dE$  diviso per  $dm$ , in cui  $dE$  è l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un elemento volumetrico e  $dm$  la massa di materia contenuta in tale elemento volumetrico;
- e) Gray (Gy): nome speciale dell'unità S.I di dose assorbita

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$$

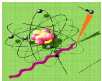
I fattori di conversione da utilizzare quando la dose assorbita è espressa in rad sono i seguenti:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

- f) sorgente di radiazioni : apparecchio generatore di radiazioni ionizzanti (macchina radiogena) o materia radioattiva, ancorchè contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, dei quali, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività, o la concentrazione di radionuclidi, o l'emissione di radiazioni;
- g) sorgente sigillata: sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili;
- h) sorgente non sigillata: qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente sigillata;
- i) sostanza radioattiva: ogni specie chimica contenente uno o più radionuclidi di cui, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività o la concentrazione;





- l) dose (H): grandezza radioprotezionistica ottenuta moltiplicando la dose assorbita (D) per fattori di modifica determinati sperimentalmente, al fine di qualificare il significato della dose assorbita stessa per gli scopi della radioprotezione;
- m) sievert (Sv): nome speciale dell'unità S.I. di dose.  
Se il prodotto dei fattori di modifica è uguale a 1  
 $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$

Quando l'equivalente di dose è espresso in rem valgono le seguenti relazioni:

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

## GRANDEZZE DI CAMPO PRIMARIE (definite in assenza di ricettore)

### FLUENZA DI PARTICELLE

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

### ESPOSIZIONE

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Un tempo misurata in röntgen (R)  
 $1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$

### KERMA IN ARIA

$$K_{\text{air}} = \frac{dE_{\text{tr}}}{dm}$$

$dE_{\text{tr}}$  è la somma delle energie cinetiche iniziali di tutte le particelle cariche prodotte da particelle indirettamente ionizzanti nell'elemento di volume di massa  $dm$

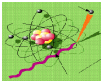
RADIAZIONI INDIRETTAMENTE  
IONIZZANTI



PRODUZIONE DI  
SECONDARI CARICHI



DEPOSIZIONE  
DELL'ENERGIA



## GRANDEZZE DOSIMETRICHE

### ENERGIA IMPARTITA

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

$R_{in}$  = energia radiante incidente

$R_{out}$  = energia radiante uscente

$\sum Q$  = energia spesa per aumentare la massa del sistema

### DOSE ASSORBITA

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Si misura in gray (Gy):

1Gy = 1J / 1kg

1Gy = 100 rad (1rad = 100erg / 1g)

### RELAZIONE TRA DOSE ASSORBITA ED ESPOSIZIONE (equilibrio di particelle cariche)

$$D = \frac{\overline{W}_a}{e} X$$

$\overline{W}_a$  = energia media per produrre una coppia di ioni in aria (~34 eV)

nelle stesse condizioni il kerma e la dose assorbita praticamente coincidono.

## INDICATORI DEL RISCHIO DA RADIAZIONI IONIZZANTI

### EQUIVALENTE DI DOSE

$$H = QDN$$

Si misura in sievert (Sv):

1Sv = 1J / 1kg

1Sv = 100 rem (1rem = 100erg / 1g)

Q = fattore di qualità

N = altri fattori correttivi, attualmente N = 1.

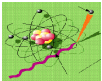
### EFFICACIA BIOLOGICA RELATIVA (EBR)

$$R_B(p) = \frac{D_A(p)}{D_B(p)}$$

Si prende come riferimento

la radiazione elettromagnetica

p = livello di probabilità per l'effetto considerato



## IL LET (LINEAR ENERGY TRANSFER)

$$L_{\Delta} = \left( \frac{dE}{dl} \right)_{\Delta}$$

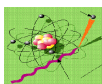
$\Delta$  = limite superiore per l'energia trasferita. Il LET si misura in keV  $\mu\text{m}^{-1}$ .  
Se si prendono in considerazione tutte le perdite di energia il LET (in questo caso  $L_{\bullet}$ ), coincide con il potere frenante per collisione.

## L'EQUIVALENTE DI DOSE

$$\overline{Q} = \frac{1}{D} \int Q(L) D(L) dL$$

con  $L_{\bullet}$  valutato in acqua.





## 13. LE RADIAZIONI IONIZZANTI E L'AMBIENTE IN CUI VIVIAMO

### 13.1. Le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

Come è noto, la radioattività è una normale componente dell'ambiente naturale. L'uomo è stato costantemente esposto alle radiazioni di origine naturale fin dal suo apparire sulla terra e queste sono rimaste l'unica fonte di irradiazione fino a poco meno di un secolo fa. Ancora adesso, malgrado il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, la radioattività naturale continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione ed è assai improbabile che ciò non continui a verificarsi anche in futuro.

Nella radioattività naturale si distinguono una componente di origine terrestre e una componente di origine extra-terrestre. La prima è dovuta ai radionuclidi cosiddetti primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione. La seconda è costituita dai raggi cosmici. Quando ci si riferisce a queste sorgenti, si parla di fondo naturale di radiazioni.

I principali radionuclidi primordiali sono il  $K^{40}$ , il  $Rb^{87}$  e gli elementi delle due serie radioattive dell' $U^{238}$  e del  $Th^{232}$ . Si tende in genere ad ignorare la serie dell' $U^{235}$ , per la modesta abbondanza relativa del capostipite, anche se ciò può non essere giustificato in termini dosimetrici.

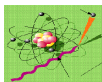
La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree. In generale le rocce ignee e i graniti contengono  $U^{238}$  in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Alcune rocce sedimentarie di origine marina possono però contenere  $U^{238}$  in concentrazione assai elevata. L'uranio, come anche il torio, è più abbondante nelle rocce acide che in quelle basiche.

Tipici valori di concentrazioni di attività nel suolo sono compresi tra 100 e 700  $Bq.kg^{-1}$  per il  $K^{40}$ , tra 10 e 50  $Bq.kg^{-1}$  per i radionuclidi delle serie radioattive dell' $U^{238}$  e del  $Th^{232}$ .

Nell'aria, la radiazione naturale è dovuta principalmente alla presenza di radon e toron, cioè di gas (7,5 volte più pesanti dell'aria) appartenenti alle famiglie dell'uranio e del torio. Il decadimento dell'uranio<sup>-238</sup> porta infatti alla formazione di  $Ra^{226}$  che, emettendo una particella alfa, decade in  $Rn^{222}$ , cioè radon; nella famiglia del torio, il decadimento del  $Ra^{224}$  porta alla formazione del  $Rn^{220}$ , un gas chiamato toron. Il radon<sup>-222</sup> è 20 volte più importante del radon<sup>-220</sup>. Il contributo maggiore alla dose deriva dai figli del radon piuttosto che dal gas stesso e principalmente dalla sua inalazione in luoghi chiusi.

Numerosi materiali da costruzione emettono quantità relativamente modeste di radon. Molto più radioattivi sono il granito, la pietra pomice, alcuni prodotti di scarto usati nell'edilizia come il fosfato di gesso e le scorie di altiforni, nonché il tufo e la pozzolana, pure diffusamente utilizzati in edilizia. Tuttavia la principale sorgente di radon si situa quasi sempre nel terreno sottostante le case. I livelli di concentrazione nell'aria sono fortemente variabili a seconda delle condizioni ambientali.

Sulla base degli esiti di una recente campagna nazionale, il valore medio della concentrazione di radon in aria nelle abitazioni italiane è risultato di 77  $Bq.m^{-3}$ . Le percentuali di case con



concentrazioni superiori a  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  o a  $400 \text{ Bq.m}^{-3}$  sono risultate rispettivamente il 5% e l'1%. Un livello di  $200 \text{ Bq.m}^{-3}$  implica una dose efficace di 3 mSv/anno.

Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo. Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree usate negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici.

Attraverso la catena alimentare entrano nel corpo umano piccole quantità di sostanze radioattive. I principali radioisotopi presenti sono il  $\text{K}^{-40}$ , il  $\text{Ra}^{-226}$ , il  $\text{Ra}^{-228}$  e il  $\text{C}^{-14}$ .

I raggi cosmici provengono, per la maggior parte, dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, alfa, nuclei pesanti), che quando giungono in prossimità della terra, risentono dell'azione derivante dal campo magnetico terrestre. C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste essenzialmente di protoni.

L'interazione di queste particelle di alta energia (raggi cosmici primari) con l'atmosfera terrestre comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, quali ad esempio mesoni (particelle di massa compresa tra l'elettrone ed il protone), elettroni, fotoni, protoni e neutroni che a loro volta possono creare altre particelle secondarie. Per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera e sulla terra i raggi cosmici secondari sono principalmente costituiti da mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni.

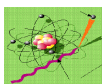
Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, in quanto il campo magnetico della terra devia la radiazione. Il livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo. A 10 km di altitudine, ad esempio, l'esposizione alla radiazione cosmica è quasi 100 volte più elevata di quella a livello del mare. L'atmosfera produce infatti al livello del mare una protezione equivalente a quella di uno schermo di calcestruzzo di circa 4 m di spessore, mentre alla quota di 10.000 m l'effetto di schermaggio si riduce a circa 1 m.

L'esposizione alla radiazione cosmica è di notevole interesse per gli equipaggi degli aerei destinati ai voli intercontinentali.

In Tabella I sono riportati gli equivalenti di dose efficace ricevuti mediamente dalla popolazione mondiale che vive in aree a fondo naturale di radiazioni normale, secondo recenti stime dell'UNSCEAR.

Come si può notare, circa la metà della dose ricevuta è attribuibile all'inalazione dei discendenti a vita breve del Radon<sup>-222</sup> e del Radon<sup>-220</sup>, prodotti di decadimento dell' $\text{U}^{-238}$  e del  $\text{Th}^{-232}$ .

Dosi esterne più elevate possono essere ricevute da gruppi di popolazione abitanti in località di alta montagna o in regioni a fondo naturale elevato.



**TAB. I** - Equivalenti di dose efficace annuali dovuti a sorgenti naturali di radiazioni ricevuti in aree con fondo normale (mSv/anno)

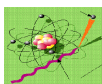
<b>SORGENTE</b>	<b>IRRADIAZIONE ESTERNA</b>	<b>IRRADIAZIONE INTERNA</b>	<b>TOTALE</b>
Raggi cosmici			
componente direttamente ionizzante	0.30		0.30
neutroni	0.055		0.055
Radionuclidi cosmogenici		0.015	0.015
Radionuclidi primordiali $K^{40}$	0.15	0.18	0.33
$Rb^{87}$		0.006	0.006
$U^{238}$ (serie)	0.10	1.24	1.34
$Th^{232}$ (serie)	0.16	0.18	0.34
<b>TOTALE (arrotondato)</b>	<b>0.8</b>	<b>1.6</b>	<b>2.4</b>

### 13.2. Sorgenti artificiali di radiazioni ionizzanti

L'impiego di radiazioni ionizzanti è diventato ormai essenziale in molte attività umane, nelle quali vengono abitualmente impiegate sorgenti di radiazioni prodotte dall'uomo. E' qui sufficiente limitarsi a ricordare l'impiego di radionuclidi artificiali e di macchine radiogene nei settori industriale, sanitario e della ricerca.

Numerosissime sono le sorgenti radioattive artificiali contenute in strumenti di uso quotidiano impiegate per le più svariate applicazioni industriali (rivelatori di incendio, rivelatori di livello, rivelatori di umidità e contenuto d'acqua, quadranti di orologio, sistemi antistatici, insegne luminose, etc.). Vengono inoltre usati, anche se più diffusamente in altri Paesi, dispositivi a raggi X e gamma (grandi irradiator, acceleratori di particelle) per la determinazione di difetti nelle saldature e nelle strutture di fusione, per la sterilizzazione di derrate alimentari e di prodotti medicali, etc.

Riferendosi al settore industriale, per la particolare situazione determinatasi nel nostro Paese, si è tralasciato di considerare i reattori di potenza per la produzione di energia elettrica, che costituiscono invece gli impianti industriali di maggior rilevanza in vari Paesi del mondo.



Per quanto riguarda il settore medico, è a tutti noto il diffusissimo impiego delle sorgenti di radiazioni sia in diagnostica che in terapia. Attualmente le applicazioni in questo settore costituiscono la seconda causa di esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti e la maggior fonte di esposizione alle radiazioni artificiali.

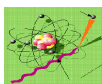
Oltre alle tradizionali apparecchiature a raggi X della radiologia, conviene ricordare l'utilizzazione dei radioisotopi nella medicina nucleare, ove si ricorre alla rivelazione dei radionuclidi iniettati nell'uomo per lo studio di numerosi processi e per la localizzazione di tumori.

Questi radionuclidi vengono prodotti principalmente con i reattori nucleari, ma anche con gli acceleratori di particelle e, in primo luogo, con i ciclotroni. Conviene anche ricordare l'impiego degli acceleratori di particelle (soprattutto acceleratori lineari e betatroni) e dei radionuclidi (sorgenti di cesio e di cobalto) nella radioterapia tumorale. In questo ambito merita inoltre menzionare i notevoli sviluppi tecnologici verificatisi negli ultimi lustri con la produzione dei tomografi, che mediante raggi X e gamma forniscono immagini di organi con elevata risoluzione spaziale (PET: tomografia ad emissione di positroni; TAC: tomografia assiale computerizzata a raggi X).

Dopo la scoperta dei raggi X da parte di Roentgen nel 1895 e della prima reazione nucleare da parte di Lord Rutherford nel 1919, le radiazioni sono state infine impiegate sempre più estensivamente nel campo della ricerca, nelle più diverse discipline. Praticamente impossibile elencare tutti i settori di applicazione scientifica. Un cenno particolare merita però, per la enormi ricadute anche extra-scientifiche che ne sono conseguite, la ricerca nel campo della fisica nucleare che si svolge principalmente presso gli acceleratori di particelle. Nello studio della costituzione intima della materia uno degli aspetti più rilevanti è stato quello della identificazione delle cosiddette "particelle elementari", cioè di quelle particelle fondamentali di cui è composto il nostro universo.

Con il procedere degli studi sono state identificate strutture interne in particelle precedentemente considerate "elementari", cioè indivisibili. Ad esempio, l'atomo è risultato composto di un nucleo ed elettroni, il nucleo è risultato a sua volta composto di neutroni e di protoni. In anni recenti anche questi hanno evidenziato una struttura interna fatta di quarks.

Questi studi vengono portati avanti facendo interagire le particelle accelerate ad alta energia con altre particelle. Più piccola è la struttura da evidenziare, più elevata è l'energia necessaria per evidenziarla. Di qui la necessità, per la ricerca fisica, di disporre di acceleratori sempre più potenti.



## 14. PRINCIPALI RADIOELEMENTI IMPIEGATI NEI LABORATORI

### 14.1. Trizio ( $H^3$ )

*Caratteristiche fisiche:*

<b>Emettitore</b>	Beta puro
<b>Forma</b>	Solubile
<b>Energia</b>	Media = 0,006 MeV Max = 0,018 MeV
<b>Attività specifica</b>	$9,8 \times 10^{-3}$ Ci/g come elemento $2,6 \times 10^{-3}$ Ci/g come biossido
<b>Periodo di dimezzamento</b>	$4,5 \times 10^3$ giorni (pari a 12,26 anni)
<b>CMA in acqua</b>	$3 \times 10^{-2}$ $\mu$ Ci/cc
<b>CMA in aria</b>	$2 \times 10^{-6}$ $\mu$ Ci/cc
<b>Organo critico</b>	Tessuto corporeo (per immissione = pelle)
<b>Radiotossicità</b>	Debole (gruppo 4°)

**CMA: Concentrazioni Massime Ammissibili**

Il trizio generalmente si trova sotto forma di molecola marcata in un gran numero di composti organici che normalmente vengono impiegati in studi di medicina o biologia come traccianti. Tra gli altri si ricordano: timidina  $-H^3$ , benzoato di sodio  $-H^3$ ; paraffina anche in soluzione, ad esempio in alcuni impianti nucleari come i reattori ad acqua pesante, ove si forma per cattura neutronica dando luogo ad acqua tritiata. Per evaporazione il trizio, presente in aria, può essere assorbito nel corpo o attraverso i polmoni, ovvero attraverso la pelle. Approssimativamente, si può affermare che l'intensità di assorbimento attraverso i polmoni, è uguale alla intensità di assorbimento attraverso la pelle di tutto il corpo. Nei casi di rischio di contaminazioni da traccianti in soluzioni, sono sufficienti le normali precauzioni da adottare per le manipolazioni delle soluzioni radioattive come ad esempio guanti, camici, superfici isolate piane, banchi e cappe radiochimiche, etc.

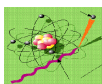
### 14.2. Fosforo 32 ( $P^{32}$ )

*Caratteristiche fisiche:*

<b>Emettitore</b>	Beta puro
<b>Energia</b>	Max = 1,71 MeV
<b>Attività specifica</b>	$2,86 \times 10^5$ Ci/g
<b>Periodo di dimezzamento</b>	14,3 giorni
<b>CMA in acqua</b>	$2 \times 10^{-4}$ $\mu$ Ci/cc
<b>CMA in aria</b>	$2 \times 10^{-8}$ $\mu$ Ci/cc
<b>Organo critico</b>	Ossa
<b>Massimo carico corporeo</b>	6 $\mu$ Ci
<b>Radiotossicità</b>	Moderata (gruppo 3°)

**CMA: Concentrazioni Massime Ammissibili**





### 14.3. Carbonio 14 (C<sup>14</sup>)

*Caratteristiche fisiche:*

<b>Emettitore</b>	Beta puro
<b>Forma</b>	Solubile
<b>Energia</b>	Media = 0,050 MeV Max = 0,155 MeV
<b>Attività specifica</b>	4,61 Ci/g
<b>Periodo di dimezzamento</b>	2,03 x 10 <sup>6</sup> giorni (5560 anni)
<b>CMA in acqua</b>	8 x 10 <sup>-3</sup> µCi/cc
<b>CMA in aria</b>	10 <sup>-6</sup> µCi/cc
<b>Organo critico</b>	Ossa (per immersione = pelle)
<b>Radiotossicità</b>	Moderata (gruppo 3°)

**CMA: Concentrazioni Massime Ammissibili**

### 14.4. Iodio 131 (I<sup>131</sup>)

*Caratteristiche fisiche:*

<b>Emettitore</b>	Beta - gamma
<b>Energia</b>	Beta: 608 keV (87%) Gamma: 364 keV (80%)
<b>Periodo di dimezzamento</b>	8,5 giorni
<b>CMA in acqua</b>	10 <sup>-5</sup> µCi/cc
<b>CMA in aria</b>	2 x 10 <sup>-9</sup> µCi/cc
<b>Organo critico</b>	Tiroide
<b>Radiotossicità</b>	Elevata (gruppo 2°)

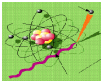
**CMA: Concentrazioni Massime Ammissibili**

### 14.5. Zolfo (S<sup>35</sup>)

*Caratteristiche fisiche:*

<b>Emettitore</b>	Beta puro
<b>Forma</b>	Solubile
<b>Energia</b>	1,67 keV
<b>Periodo di dimezzamento</b>	87,2 giorni
<b>CMA in acqua</b>	6 x 10 <sup>-4</sup> µCi/cc
<b>CMA in aria</b>	9 x 10 <sup>-8</sup> µCi/cc
<b>Organo critico</b>	Gonadi
<b>Radiotossicità</b>	Debole (gruppo 4°)

**CMA: Concentrazioni Massime Ammissibili**



## 15. IRRADIAZIONE ESTERNA E IRRADIAZIONE INTERNA

Si è già detto che si parla di irradiazione o esposizione esterna quando la sorgente di radiazioni resta all'esterno del corpo umano. Quando la sorgente viene invece introdotta nell'organismo (contaminazione interna) si parla di irradiazione o esposizione interna. La contaminazione interna può verificarsi tutte le volte che si manipolano sorgenti non sigillate, sorgenti cioè prive di un involucro inerte o, se presente, non tale da prevenire, in condizioni normali di impiego, la dispersione delle materie radioattive.

Nel primo caso, i provvedimenti da adottare per ridurre l'esposizione e quindi le dosi ricevute sono piuttosto semplici. Essi consistono infatti nello:

- a) schermare la sorgente;
- b) aumentare la distanza tra sorgente e persona esposta;
- c) diminuire il tempo di esposizione.

Le regole sopra indicate restano valide, per quanto applicabili, anche nel caso della manipolazione di sorgenti non sigillate. Ad esse si devono però aggiungere appropriate procedure di igiene del lavoro (uso di indumenti protettivi, barriere di contenimento, etc.) che rendano di fatto del tutto improbabile l'introduzione della contaminazione nell'organismo umano. Merita ricordare infatti che, in materia di contaminazione interna, l'unica misura realmente efficace è proprio quella di prevenire qualsiasi introduzione.

### 15.1. Rischio di contaminazione

La liberazione di radioelementi può comportare:

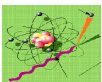
#### ➤ *Contaminazione delle superfici e del pavimento*

Questo tipo di contaminazione può essere provocato da:

1. Sversamento o proiezione di liquidi radioattivi;
2. Dispersione di materie radioattive solide sotto forma di polveri, pastiglie, etc.

Occorre prendere ogni precauzione utile per evitare l'estensione della contaminazione, per cui i differenti mezzi da usare sono:

- ❑ Nel primo caso dovranno essere utilizzati prodotti assorbenti: terra, sabbia, polvere, etc.
- ❑ Nel secondo caso, salvo norme particolari, si dovrà umidificare leggermente per mezzo di acqua polverizzata. Devono essere evitati spargimenti di acqua e le zone contaminate dovranno essere delimitate e segnalate per impedirne l'accesso incontrollato.



### ➤ *Contaminazione atmosferica*

Può essere provocata da radioelementi sotto forma di polveri, aerosol, vapori e gas, etc. e la sua estensione, legata naturalmente alle condizioni meteorologiche, è difficilmente controllabile.

Il rischio più grave è dovuto all'inalazione dei prodotti in sospensione nell'aria: per questa ragione il personale di pronto intervento deve indossare maschere antigas, antipolvere e autorespiratori.

A volte questo tipo di contaminazione porta, per ricaduta, a contaminazioni più o meno estese di superfici che bisogna rivelare e togliere.

## 15.2. **Rischio di irradiazione esterna**

Questo rischio accompagna sempre una contaminazione dovuta a emettitori di radiazioni penetranti. Le norme di protezione contro l'irradiazione sono le seguenti:

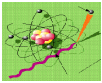
- ❑ Tenersi a distanza dalla sorgente;
- ❑ Servirsi di schermi protettivi;
- ❑ Limitare il tempo di esposizione quando certe operazioni in prossimità della sorgente non possono essere evitate.

## 16. RISCHIO DI IRRADIAZIONE ESTERNA IN CASO DI INCENDIO

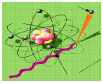
Da quanto detto nei paragrafi precedenti risulta che un certo numero di norme classiche per la lotta contro gli incendi deve essere modificato quando si ha a che fare con materiali radioattivi.

Le principali norme da seguire sono le seguenti:

- ❑ Deve ritenersi più urgente la protezione di materiale radioattivo implicato in un incendio, tenuto conto delle circostanze e delle caratteristiche, che non la lotta contro l'estensione dell'incendio a locali con rischi convenzionali;
- ❑ L'attacco al fuoco dovrà essere portato da più lontano possibile e dal minimo numero necessario di persone. Queste dovranno obbligatoriamente essere munite di autorespiratori o maschere antigas-antipolvere per evitare l'installazione di particelle dannose.
- ❑ L'utilizzazione dell'acqua deve essere ridotta al minimo per evitare, nella maggioranza dei casi, l'estensione delle contaminazioni superficiali e, in alcuni casi eccezionali, il grave rischio di criticità. Dovrà essere utilizzata di preferenza acqua polverizzata, con getto tanto più forte quanto più grave è l'incendio, in quanto la vaporizzazione dell'acqua abbassa la temperatura e abbatte le polveri con conseguente diminuzione del rischio di contaminazione atmosferica.
- ❑ Il getto a tiro diretto è da escludersi tranne nei casi in cui venga usato per raffreddare le pareti esterne dei locali o per difendere questi ultimi dal rischio di propagazione del fuoco. In effetti questo getto può rovesciare o rompere i recipienti o gli involucri contenenti materiali radioattivi che rischiano così di essere dispersi nell'ambiente.



- ❑ Ogni volta che ciò è possibile, bisogna utilizzare estintori a polvere o a CO<sub>2</sub> preferendoli all'acqua o alla schiuma.
- ❑ Dopo lo spegnimento, bisogna ridurre al minimo la manipolazione dei materiali che possono produrre bruciature, rotture, ferite o semplicemente graffiature (rischio di contaminazione interno).
- ❑ I materiali di scarto prodotti dall'incendio, non dovranno essere rilasciati se non dopo attento e rigoroso controllo da parte dell'Esperto Qualificato.
- ❑ Deve essere organizzata una zona ristretta per il controllo del personale di intervento. Tale zona deve permettere il controllo rapido della contaminazione superficiale degli abiti e del materiale nonché il controllo dell'irradiazione alla quale il personale è stato esposto.
- ❑ Per evitare il rischio di estensione della contaminazione, il personale di intervento non dovrà lasciare la zona di controllo senza essere stato controllato ed eventualmente decontaminato. Ogni persona sulla quale saranno rilevate tracce, anche leggere, di contaminazione dovrà lasciare gli indumenti contaminati o nella zona di controllo o in un locale adiacente. La maschera deve essere conservata durante le operazioni di svestizione. Gli indumenti contaminati devono essere posti in sacchetti di plastica sufficientemente resistenti e sigillati. All'uopo occorre preventivamente prevedere una scorta adeguata di tali sacchetti per tali circostanze.



## 17. EFFETTI SULL'UOMO DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

I danni prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere distinti in tre categorie principali:

- a) danni somatici deterministici;
- b) danni somatici stocastici;
- c) danni genetici stocastici.

Si dicono somatici i danni che si manifestano nell'individuo irradiato, genetici quelli che si manifestano nella sua progenie.

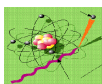
### 17.1. Danni somatici deterministici

Per danni deterministici s'intendono quelli in cui la frequenza e la gravità variano con la dose e per i quali è individuabile una dose-soglia. In particolare, i danni deterministici hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- a) compaiono soltanto al superamento di una dose-soglia caratteristica di ogni effetto;
- b) il superamento della dose-soglia comporta l'insorgenza dell'effetto in tutti gli irradiati, sia pure nell'ambito della variabilità individuale; il valore della dose-soglia è anche in funzione della distribuzione temporale della dose (in caso di esposizioni protratte la soglia si eleva secondo un "fattore di protrazione");
- c) il periodo di latenza è solitamente breve (qualche giorno o qualche settimana); in alcuni casi l'insorgenza è tardiva (qualche mese, alcuni anni);
- d) la gravità delle manifestazioni cliniche aumenta con l'aumentare della dose.

Di grande importanza radioprotezionistica sono al riguardo i valori-soglia per i danni deterministici a carico di testicoli, ovaie, cristallino e midollo osseo, per l'esposizione singola di breve durata e per l'esposizione protratta e frazionata, sia annuale che totale (Tab. II).





**TAB. II** - Stima nell'individuo adulto della soglia di dose per danni non stocastici a carico dei testicoli, delle ovaie, del cristallino e del midollo osseo.

TESSUTO ED EFFETTO	SOGLIA DI DOSE		
	EQUIVALENTE DI DOSE TOTALE RICEVUTO IN UNA SINGOLA BREVE POSIZIONE (Sv)	EQUIVALENTE DI DOSE TOTALE RICEVUTO PER ESPOSIZIONI FORTEMENTE FRAZIONATE O PROTRATTE (Sv)	DOSE ANNUALE RICEVUTA PER ESPOSIZIONI FORTEMENTE FRAZIONATE O PROTRATTE PER MOLTI ANNI (Sv/anno)
Sterilità temporanea Sterilità permanente	0.15 3.5	NA* NA	0.4 2.0
Sterilità	2.5-6.0	6.0	>0.2
<b>Cristallino</b>			
Opacità osservabili ++	0.5-2.0	5.0	>0.1
Deficit visivo(cataratta)	5.0	>8.0	>0.15
<b>Midollo osseo</b>			
Depressione dell'emopoiesi	0.5	NA	>0.4
Aplasia mortale	1.5	NA	>0.4

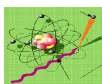
\* NA: "Non Applicabile", in quanto la soglia dipende dalla intensità di dose che dalla dose totale.

++ Opacità lenticolari appena osservabili

Oltre alle sedi indicate nella Tabella II, anche per le radiolesioni cutanee causate da esposizione acuta alle radiazioni ionizzanti è possibile descrivere un quadro clinico che comprenda i vari tipi di alterazione cutanea radioindotta con le relative dosi-soglia e gli andamenti evolutivi.

Per quanto riguarda l'irradiazione frazionata della cute, merita precisare in via indicativa che le dosi-soglia per ulcerazioni e fibrosi cutanee a 5 anni dal trattamento radioterapico con raggi X o radiazioni g (campo 100 cm<sup>2</sup>) sono state stimate come segue:

**Corso sulla protezione dalle radiazioni ionizzanti - Anno 2000**  
**A cura degli Esperti Qualificati Dott. Ing. Aldo DELIA - Dott. Ing. Giovanni CALISESI**



- dose che causa l'effetto in 1-5% dei pazienti: 55 Gy;
- dose che causa l'effetto in 25-50% dei pazienti: 70 Gy.

Nell'irradiazione cronica della pelle (soprattutto in corrispondenza delle mani) l'esperienza clinica, acquisita soprattutto nella "fase eroica" della radiologia, ha dimostrato che sono necessarie dosi di qualche decimo di Gy alla settimana e per lunghi periodi (molti mesi, anni) per causare una radiodermite cronica ("cute del radiologo").

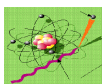
Questa radiolesione cutanea è caratterizzata da cute secca e sottile, con verruche, ispessimenti irregolari dello strato corneo (ipercheratosi), dilatazione dei capillari venosi (telangiectasie), alterazioni delle unghie (onicopatia), stentata riparazione delle piccole ferite cutanee. In una frazione dei casi dopo molti anni può comparire un tumore (epitelioma) nell'ambito delle suddette alterazioni cutanee.

Un ulteriore riferimento a livello cutaneo è rappresentato dal fatto che alterazioni delle arteriole e venule dello strato inferiore della pelle (vasi dermici), sono svelabili, in assenza di segni clinici a carico della cute, con metodi diagnostici microscopici (capillaroscopia) soltanto per esposizioni a dosi dell'ordine di 10 - 30 Gy di radiazioni di basso LET (fotoni, elettroni) accumulate in un periodo di 8 - 25 anni.

Qualora l'irradiazione acuta avvenga al corpo intero o a larga parte di esso (irradiazione globale), viene a determinarsi, per dosi sufficientemente elevate, la cosiddetta sindrome acuta da irradiazione. Questa sindrome è caratterizzata da tre forme cliniche (ematologica, gastro-intestinale e neurologica) progressivamente ingravescenti che sopravvivono in funzione delle rispettive dosi-soglia (Tab. III).

**TAB. III** - Sindrome acuta da irradiazione: forme cliniche ai vari livelli di dose assorbita (espressa in Gy)

<b>Sindrome acuta da irradiazione</b>	<b>Dose assorbita (Gy)</b>	<b>Forma Clinica</b>
Forma ematologica	0.25	Sopravvivenza virtualmente certa soglia della sindrome ematologica (ospedalizzazione) sopravvivenza probabile sopravvivenza possibile sopravvivenza virtualmente impossibile
	1	
	1÷2	
	2÷5	
	5÷6	
Forma gastrointestinale	6÷7	soglia della sindrome gastrointestinale
Forma neurologica	10	soglia della sindrome neurologica



Nella prima fase della sindrome acuta da irradiazione, particolare attenzione va rivolta all'insorgenza di sintomi, quali nausea e vomito: la brevità della latenza, l'intensità e la persistenza dei sintomi sono indicative della gravità della prognosi. Il vomito dovuto ad irradiazione compare in genere tra i 20 minuti e le 3 ore dopo l'esposizione. Qualora i sintomi dovessero insorgere oltre le prime 5-6 ore dall'esposizione è poco probabile che siano di natura radiopatologica.

In fase precoce possono comparire anche arrossamento degli occhi (iperemia congiuntivale) per dosi di 1,5 Gy ed oltre, e arrossamento cutaneo (eritema cutaneo), spesso fugace, per dosi di 5 Gy ed oltre.

La diminuzione delle cellule linfocitarie nel sangue circolante (linfopenia) rappresenta un indicatore particolarmente significativo della gravità dell'irradiazione.

L'improvviso e breve aumento delle cellule granulocitarie nel sangue circolante (punta ipergranulocitaria) osservabile nelle prime 24-36 ore, per quanto utile sul piano diagnostico, non riveste la stessa importanza clinico-dosimetrica della linfopenia.

Nel periodo di stato della forma ematologica (cioè nella fase conclamata della malattia) il quadro clinico è dominato da stato febbrile, infezioni (per riduzione nel sangue dei globuli bianchi neutrofili o neutropenia) ed emorragie (per riduzione nel sangue delle piastrine o piastrinopenia). Nella forma gastrointestinale prevalgono vomito, diarrea, squilibrio elettrolitico, febbre ed emorragie digestive.

Nella forma neurologica sono presenti offuscamento della coscienza (obnubilamento del sensorio), disorientamento, convulsioni.

Le opacità del cristallino dell'occhio indotte dalle radiazioni ionizzanti rappresentano un tipico effetto deterministico tardivo (la latenza è in genere di alcuni anni per dosi non elevate).

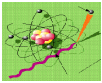
Merita precisare al riguardo che viene chiamata cataratta una qualsiasi opacità del cristallino sufficiente a provocare una diminuzione della vista.

La cataratta situata nella porzione posteriore del cristallino (varietà corticale subcapsulare posteriore), oltre ad essere radioindotta, può essere causata da molti altri fattori quali radiazioni infrarosse, radiofrequenze, ultrasuoni, sorgenti luminose di alta intensità, elettrocuzione, fattori chimici e farmacologici (per es. dinitrofenolo, naftalene, cortisonici, etc.).

Le stesse caratteristiche anatomico-cliniche possono essere assunte dalla cosiddetta cataratta complicata, che accompagna alcune malattie oculari (cheratite suppurativa, iridociclite, miopia elevata, glaucoma, retinite pigmentosa, etc.) o che viene ad associarsi a malattie extraoculari (sindrome di Marfan, ittiosi, psoriasi, diabete, etc.).

Si consideri inoltre che in una non trascurabile percentuale della comune popolazione sono presenti a carico del cristallino opacità puntiformi non progressive che non disturbano la funzione visiva.

Queste opacità, localizzate nell'area centrale o periferica del cristallino, sono in genere multiple, molto piccole e di forma irregolare. In particolare, le opacità puntiformi cosiddette "malformative" possono essere distinte in congenite (embrionarie), situate in prevalenza nel nucleo



centrale del cristallino, ed in post-natali (adolescenziali) localizzate alla sua periferia (localizzazione corticale periferica). Queste ultime, osservabili dilatando la pupilla (midriasi) con farmaci, presentano una incidenza intorno al 25% nella popolazione nel suo insieme. La frequenza delle opacità del cristallino nella comune popolazione (non esposta) aumenta con l'età.

## **17.2. Danni somatici stocastici**

I danni somatici stocastici comprendono le leucemie e i tumori solidi. In questa patologia soltanto la probabilità d'accadimento, e non la gravità, è in funzione della dose ed è cautelativamente esclusa l'esistenza di una dose-soglia.

Danni di questo tipo hanno in particolare le seguenti caratteristiche:

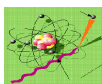
- a) non richiedono il superamento di un valore-soglia di dose per la loro comparsa (ipotesi cautelativa ammessa per gli scopi preventivi della radioprotezione);
- b) sono a carattere probabilistico;
- c) sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
- d) sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dall'evidenza epidemiologica (associazione causale statistica);
- e) la frequenza di comparsa è maggiore se le dosi sono elevate;
- f) si manifestano dopo anni, talora decenni, dall'irradiazione;
- g) non mostrano gradualità di manifestazione con la dose ricevuta, quale che sia la dose;
- h) sono indistinguibili dai tumori indotti da altri cancerogeni.

Per i danni stocastici è ammessa in radioprotezione in via cautelativa una relazione dose-effetto di tipo lineare con estrapolazione passante per l'origine delle coordinate (assenza di soglia).

L'elaborazione della relazione dose-effetto è avvenuta nel corso degli anni sulla base di osservazioni epidemiologiche che riguardano esposizioni a dosi medio-alte (sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche, pazienti sottoposti ad irradiazioni per scopi medici, esposizioni lavorative). I dati epidemiologici sono abbastanza numerosi per le alte dosi, sono piuttosto rari per le dosi medie e mancano per le piccole dosi.

L'assenza di evidenza epidemiologica alle basse dosi può essere correlata alla possibile inesistenza degli effetti radioindotti, oppure al "mascheramento" degli stessi che, pur presenti, non si rendono intellegibili sul piano epidemiologico perché compresi nelle fluttuazioni statistiche dell'incidenza "naturale" o "spontanea" dei tumori. Pertanto, la stima del rischio di ammalare di leucemia o di tumore radioindotti viene abitualmente effettuata estrapolando alle basse dosi i dati delle alte dosi.

In seguito all'irradiazione è necessario considerare un periodo minimo di risposta clinicamente silente (latenza), seguito da un periodo a rischio, in cui è attesa la comparsa (a livello diagnostico) dei tumori dovuti alla radioinduzione.



Per tutte le forme di leucemia (esclusa la leucemia linfatica cronica per la quale manca la dimostrazione radioepidemiologica) e per il cancro osseo (da alfa del radio<sup>-224</sup>) i dati epidemiologici indicano un andamento temporale ad onda con inizio dopo circa 2 anni dall'esposizione e con un picco dopo 5 - 8 anni, seguito da un lento decremento fino al ritorno verso i valori dell'incidenza "naturale" entro 30 anni o meno dall'irradiazione.

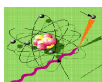
Per le restanti "sedi" tumorali è stato stabilito un tempo minimo di risposta (latenza) di 5 anni seguito da un graduale e lento incremento della probabilità di comparsa fino a 10 anni e da un incremento costante, sempre in termini probabilistici, nel periodo successivo. Il periodo a rischio deve essere cautelativamente considerato esteso a tutta la comune durata della vita.

### **17.3. Danni genetici stocastici**

Non è stato possibile sinora rilevare con metodi epidemiologici un eccesso di malattie ereditarie nella progenie di soggetti esposti alle radiazioni ionizzanti rispetto alla progenie di soggetti non esposti. Lo studio radioepidemiologico più importante è stato quello sui discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, nel corso del quale è stato effettuato un confronto tra 30.000 bambini di cui almeno uno dei genitori era stato irradiato e 40.000 bambini i cui genitori non erano stati irradiati. Nessuna differenza statisticamente significativa è apparsa tra i due gruppi per quanto concerne lo sviluppo psicofisico, le malformazioni di origine genetica ed alcuni indicatori di natura citogenetica e biochimica.

Altre indagini condotte su popolazioni umane, per quanto di minore rilevanza, non hanno fatto evidenziare effetti genetici alla prima generazione. Sebbene non sia stato dimostrato a tutt'oggi nella specie umana che le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari, studi sperimentali su piante ed animali indicano che tali danni possono di fatto insorgere. Il rischio genetico nell'uomo viene pertanto calcolato per estrapolazione partendo dalle sperimentazioni sugli animali da laboratorio.





## CLASSIFICAZIONE DEL DANNO SULL'UOMO

Danni somatici deterministici:

la frequenza e la gravità variano con la dose;  
è individuabile una dose di soglia;  
il periodo di latenza è solitamente breve

Danni somatici stocastici:

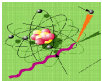
non richiedono il superamento di una dose-soglia per la loro comparsa;  
sono di tipo probabilistico;  
la frequenza della loro comparsa aumenta con la dose;  
hanno lunghi periodi di latenza;  
la loro gravità non dipende dalla dose ricevuta;

Danni genetici stocastici:

si manifestano nella progenie degli individui irraggiati.

## VALORI DI SOGLIA ACCETTATI PER GLI EFFETTI DETERMINISTICI SULL'UOMO

TESSUTO ED EFFETTO	SOGLIA DI DOSE		
	Equivalente di dose totale ricevuto in una singola breve esposizione (Sv)	Equivalente di dose totale ricevuto per esposizioni fortemente frazionate o protratte (Sv)	Dose annuale se ricevuta per esposizioni fortemente frazionate o protratte per molti anni (Sv/anno)
TESTICOLI			
Sterilità temporanea	0.15	n.a.	0.4
Sterilità permanente	3.5	n.a.	2.0
OVAIE			
Sterilità	2.5 - 6.0	6.0	> 0.2
CRISTALLINO			
Opacità osservabili	0.5 - 2.0	5.0	> 0.1
Deficit visivo (cataratta)	5.0	> 8.0	> 0.15
MIDOLLO OSSEO			
Depressione dell'emopoiesi	0.5	n.a.	>0.4
Aplasia mortale	1.5	n.a.	>1A



#### **17.4. Irradiazione in utero (embrione e feto)**

L'embrione e il feto sono sensibili alle radiazioni ionizzanti e, come avviene anche nell'esposizione agli altri agenti fisici e ad agenti chimici, questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo.

Prima dell'impianto dell'embrione (nella specie umana al 9° giorno dalla fecondazione) gli effetti di una irradiazione sono del tipo "tutto-o-nulla". Questi effetti possono determinare infatti la morte dell'embrione (l'evento può passare inosservato perché la donna non sa ancora di essere incinta) o, in alternativa, non avere conseguenze sullo sviluppo e sulla sopravvivenza post-natale che possono quindi risultare del tutto normali (nello stadio di pre-impianto la morte di una o di alcune cellule, non ancora differenziate, può non essere grave).

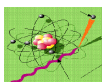
Nel periodo di morfogenesi, compreso tra il 9° giorno e la fine del 2° mese di gravidanza, si formano gli abbozzi dei vari organi e tessuti. In corrispondenza della fase di differenziazione e di organizzazione di ciascun tessuto è presente un'elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente la comparsa di malformazioni.

Durante la fase fetale (dall'inizio del 3° mese fino al termine della gravidanza) la frequenza e la gravità delle malformazioni diminuiscono, mentre risulta rilevante il rischio di uno sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale che resta radiosensibile per una buona parte di questo periodo. L'insieme delle osservazioni sull'uomo, e precisamente i dati di Hiroshima e Nagasaki, dimostrano che la sensibilità alle radiazioni ionizzanti del cervello del feto è massima tra l'8<sup>a</sup> e la 15<sup>a</sup> settimana dal concepimento. Durante questo periodo, i neuroblasti (elementi cellulari precursori dei neuroni) si moltiplicano in maniera esponenziale e migrano nella sede definitiva che è la corteccia cerebrale. Una irradiazione può interferire con questi complessi meccanismi evolutivi e quindi determinare un ritardo mentale. La sensibilità del sistema nervoso è minore di circa 4 volte tra la 16<sup>a</sup> e la 25<sup>a</sup> settimana dal concepimento ed è trascurabile o assente prima dell'8<sup>a</sup> settimana e dopo la 25<sup>a</sup> settimana.

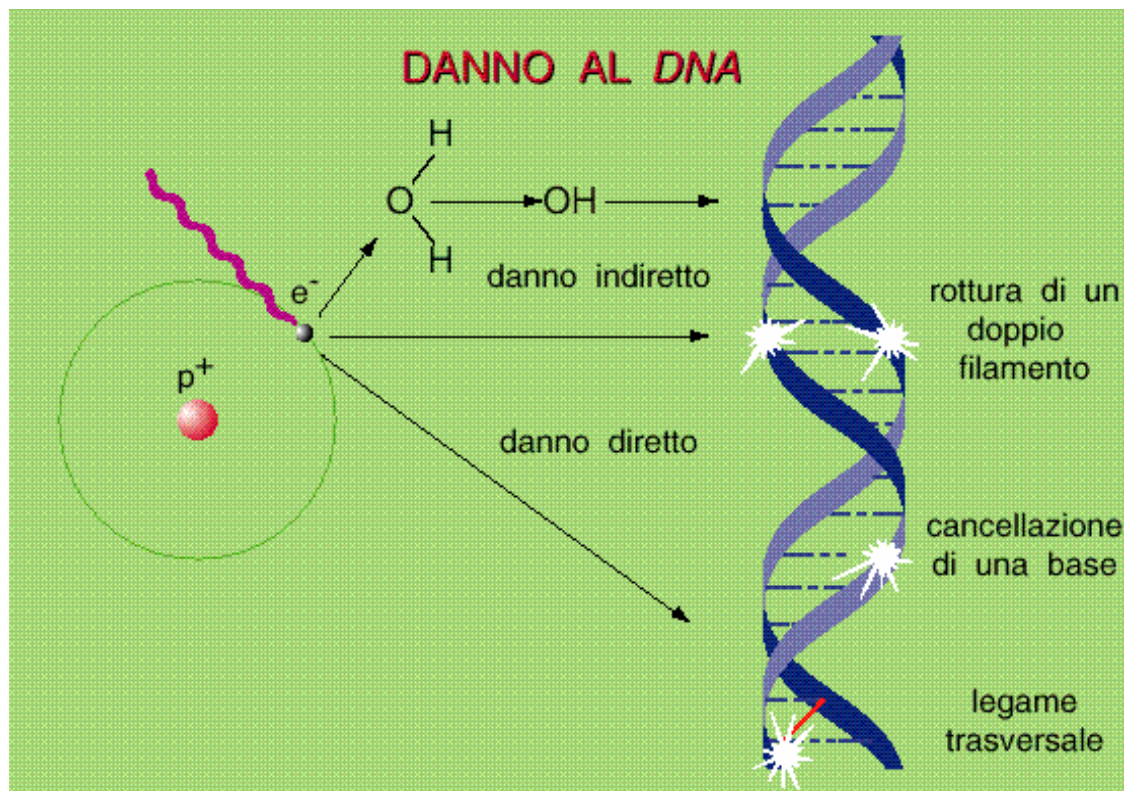
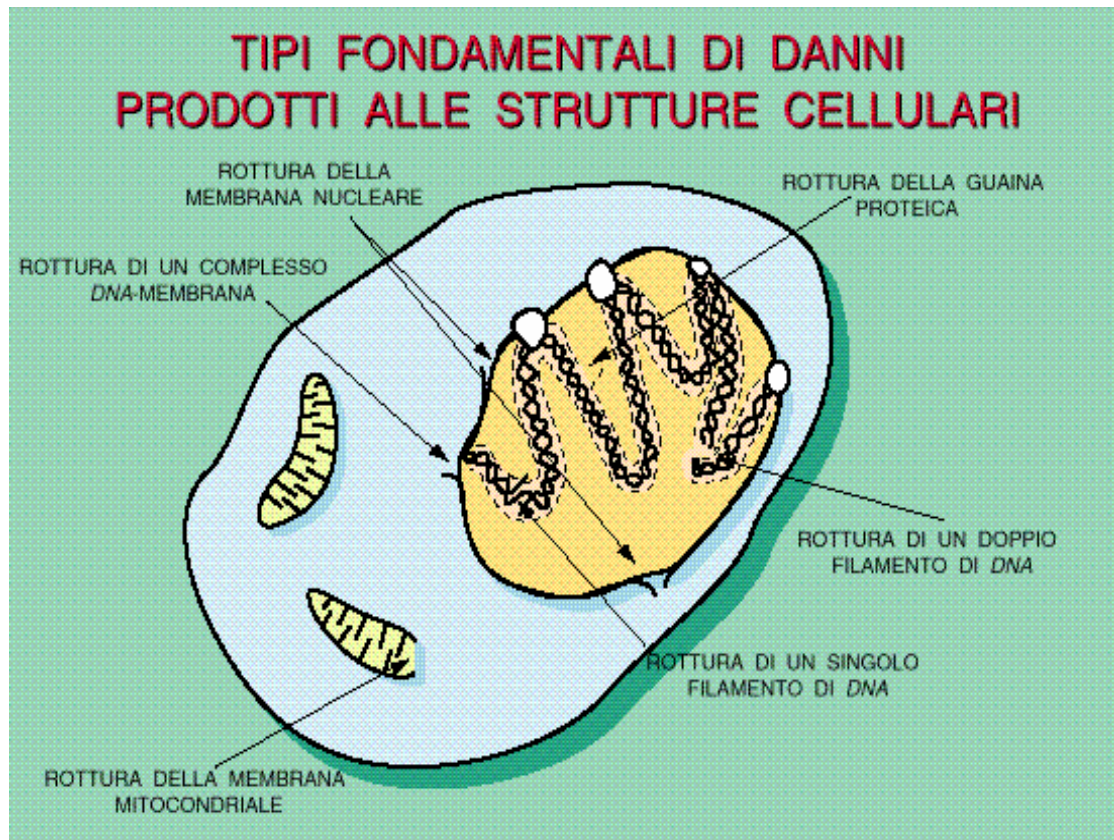
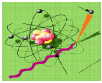
In breve, malgrado che la sensibilità dell'embrione e del feto all'irradiazione sia presente in gradi molto variabili durante tutto il periodo di gestazione, lavori scientifici recenti confermano che il danno principale è il ritardo mentale. Non dovrebbe tuttavia essere apprezzabile alcun effetto sul quoziente di intelligenza fino a dosi dell'ordine di 0,1 Sv.

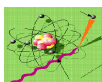
Nel periodo compreso tra la terza settimana dal concepimento e la fine della gestazione appare probabile che l'esposizione alle radiazioni possa determinare effetti stocastici che si esprimono come aumento della probabilità di neoplasie (soprattutto leucemie) in epoca post-natale.




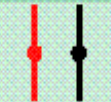

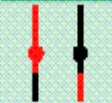
I dati disponibili, provenienti soprattutto da studi sulle madri sottoposte ad esami radiodiagnostici in gravidanza, non sono univoci e sussistono notevoli incertezze interpretative.





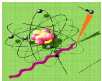




LESIONI CROMOSOMICHE				
ALL'INIZIO	AL MOMENTO DELLE LESIONI	DOPO LA RIPARAZIONE		OSSERVAZIONI
		morfologia	aberrazione	
			NORMALE	NON RILEVATO STABILE
			ANELLO PIU' FRAMMENTO	FACILMENTE RILEVABILE MA INSTABILE
			INVERSIONE	STABILE, MA DIFFICILE DA RILEVARE
			NORMALE	NON RILEVATO STABILE
			DICENTRICO PIU' FRAMMENTI	FACILMENTE RILEVABILE MA INSTABILE
			TRASLOCAZIONE	STABILE, MA DIFFICILE DA RILEVARE
CROMOSOMA SINGOLO CON DUE LESIONI DOVE DUE BRACCI SONO ADIACENTI				
DUE CROMOSOMI DISTINTI CON DUE LESIONI DOVE I BRACCI SONO ADIACENTI				



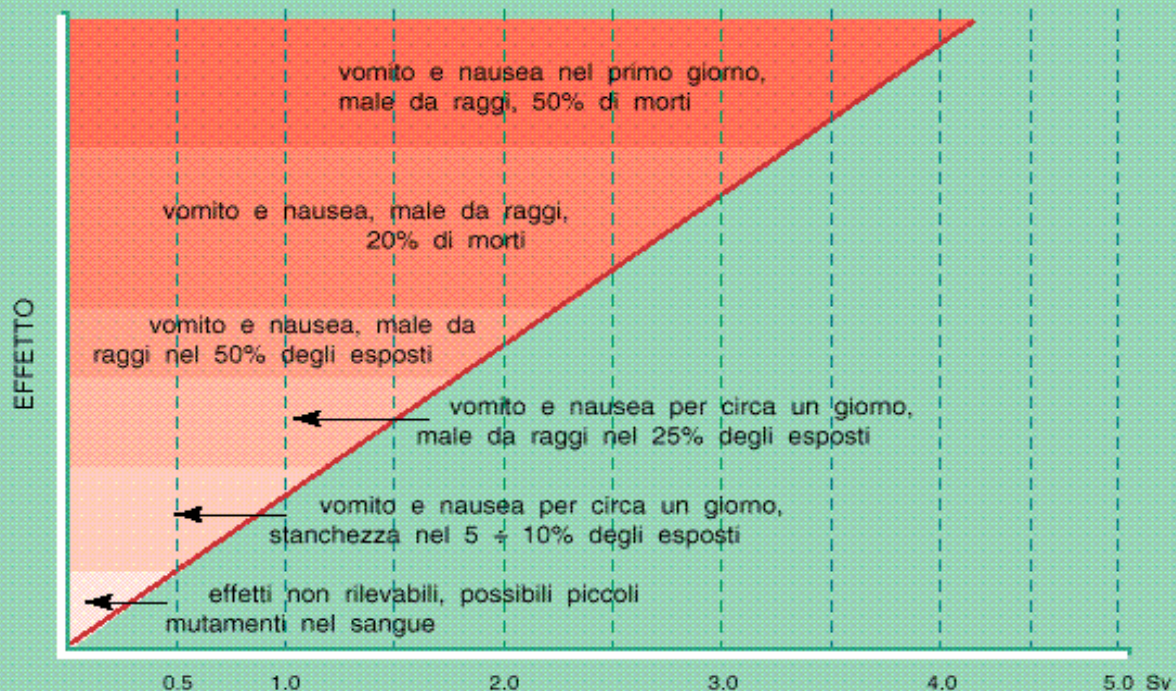




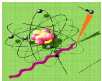
### EFFETTI PREVEDIBILI DELLE DOSI ACUTE DI RADIAZIONE ESTESE A TUTTO IL CORPO

DOSE ACUTA (Sv)	EFFETTI PROBABILI
0 ÷ 0.5:	effetti non rilevabili, eccettuata la possibilità di piccoli mutamenti nel sangue.
0.8 ÷ 1.2:	vomito e nausea, per circa un giorno, nel 5 o 10% del personale esposto; senso di stanchezza che però non limita fortemente la capacità lavorativa.
1.3 ÷ 1.7:	vomito e nausea per un giorno, seguiti da altri sintomi del male da raggi, in circa il 25% del personale esposto.
1.8 ÷ 2.2:	vomito e nausea per circa un giorno, seguiti da altri sintomi del male da raggi in circa il 50% del personale esposto; non si verificano decessi precoci.
2.7 ÷ 3.3:	vomito e nausea nel primo giorno, seguiti da altri sintomi del male da raggi, in quasi tutto il personale esposto; circa il 20% di morti in due-sei settimane dopo l'esposizione; i sopravvissuti rimangono convalescenti per circa 6 mesi.
4.0 ÷ 5.0:	vomito e nausea nel primo giorno, in tutto il personale esposto; circa il 50% di morti in un mese.
5.5 ÷ 7.5:	vomito e nausea in tutto il personale entro 4 ore dall'esposizione, seguiti dagli altri sintomi del male da raggi; quasi il 100% di morti.
10:	vomito e nausea in tutto il personale esposto, entro una o due ore; probabilmente non ci saranno superstiti.
50:	inabilità immediata: tutte le persone colpite muoiono entro una settimana.

### EFFETTI PREVEDIBILI DELLE DOSI ACUTE DI RADIAZIONE ESTESE A TUTTO IL CORPO





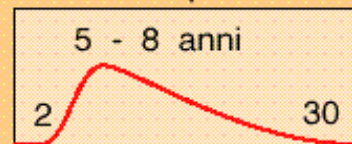


## DANNI SOMATICI STOCASTICI

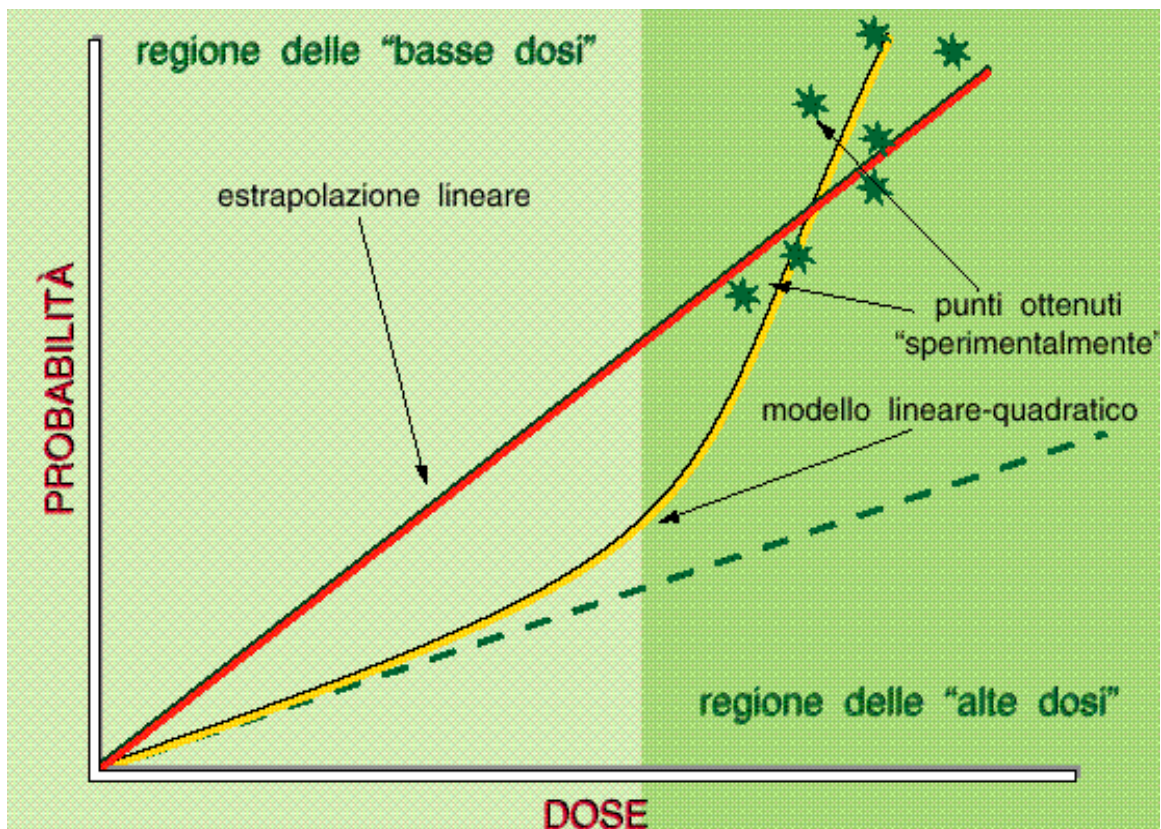
Le informazioni epidemiologiche riguardanti questo tipo di danni sono limitate, al momento, agli effetti prodotti da esposizioni medio-alte. Sono rari i dati per i bassi livelli di dose, per cui la stima del rischio di contrarre una leucemia o un altro tumore radioindotto si effettua estrapolando alle basse dosi i dati delle alte dosi.

Per questo tipo di danni si deve tenere conto di un periodo di latenza e della forma della curva che fornisce la probabilità di insorgenza.

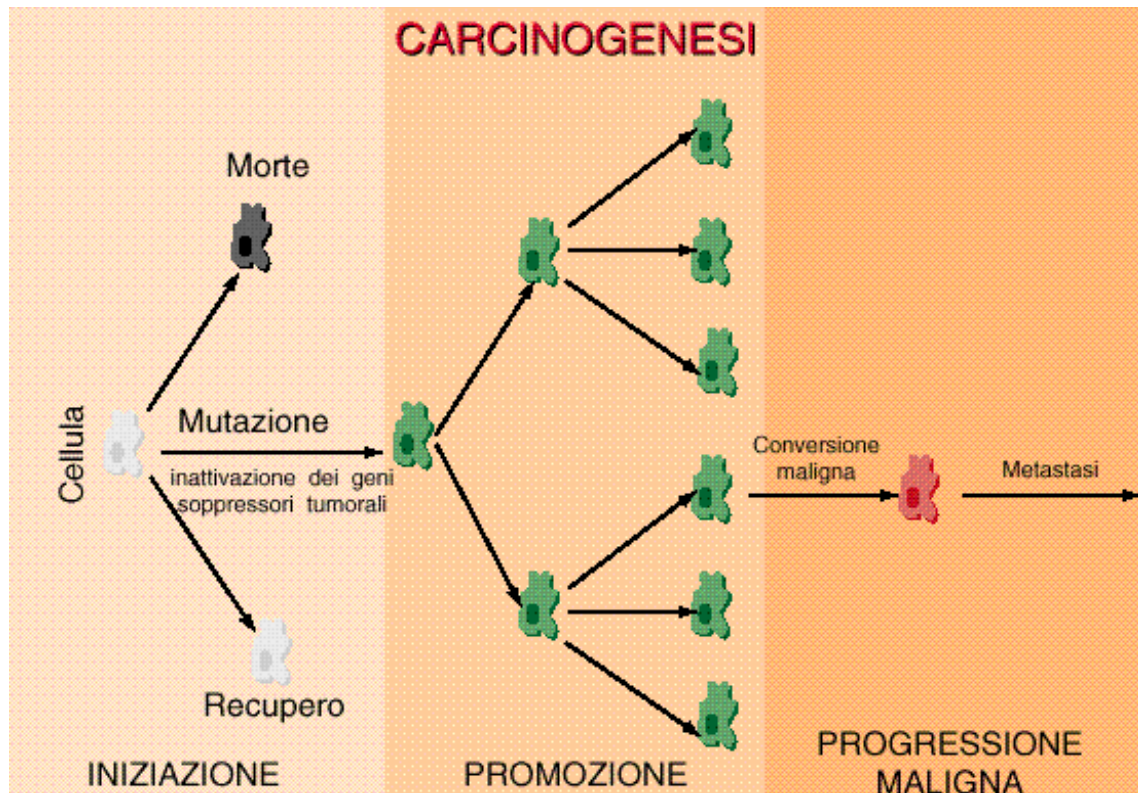
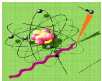
**Leucemia:** 2 anni di latenza, picco verso i 5 - 8 anni, poi calo



**Altri tumori:** più di 5 anni di latenza, crescita costante dopo i 10 anni







### GRANDEZZE LIMITE PRIMARIE (definite nell'individuo)

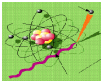
EQUIVALENTE DI DOSE EFFICACE

$$H_E = \sum_T w_T H_T$$

con  $H_T$  equivalente di dose ricevuto dal tessuto o organo T e  $w_T$  il fattore di ponderazione relativo a tale tessuto o organo.

Valori dei fattori di ponderazione

Organo o tessuto	stima del rischio (casi per $10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ )	$w_T$
Gonadi	4.0	0.25
Mammelle	2.5	0.15
Midollo osseo rosso	2.0	0.12
Polmone	2.0	0.12
Tiroide	0.5	0.03
Superficie ossea	0.5	0.03
Rimanenti organi e tessuti	5.0	0.30



## **18. I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA RADIOPROTEZIONE**

La protezione radiologica deve assicurare che tutti coloro che lavorano all'interno e all'esterno di installazioni adibite alla manipolazione di sorgenti radioattive non sigillate o che risiedano nelle zone circostanti, ricevano equivalenti di dose individuali e abbiano probabilità di esposizioni tanto basse quanto ragionevolmente ottenibili.

Gli obiettivi principali per l'attuazione delle misure di protezione sanitaria dalle radiazioni ionizzanti sono:

- Schermatura;
- Distanza;
- Limitazione della durata di esposizione;
- Combinazione di tali mezzi o accorgimenti.

La circostanza che nessuna esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, possa essere considerata completamente sicura, ha spinto l'ICRP a raccomandare un sistema di protezione radiologica basato su tre fondamentali principi:

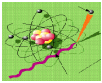
- giustificazione della pratica;
- ottimizzazione della protezione;
- limitazione delle dosi individuali.

Detti principi sono stati pienamente recepiti nella normativa di legge italiana recentemente entrata in vigore, attraverso l'art. 2 del D.Lgs. 230/95, che ne stabilisce il rispetto, nella disciplina delle attività con rischio da radiazioni ionizzanti, nei termini seguenti:

- a) i tipi di attività che comportano esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere preventivamente giustificati e periodicamente riconsiderati alla luce dei benefici che da essi derivano;
- b) le esposizioni alle radiazioni ionizzanti debbono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali;
- c) la somma delle dosi ricevute e impegnate non deve superare i limiti prescritti, in accordo con le disposizioni del presente decreto e dei relativi provvedimenti applicativi.

Si richiama in particolare l'attenzione sul secondo basilare principio, detto anche principio ALARA, attraverso il quale vengono di fatto stabiliti gli obiettivi di radioprotezione da osservare nelle varie attività, e con questi gli effettivi valori delle dosi che riceveranno i lavoratori e le persone del pubblico, di norma assai più modesti dei limiti individuali fissati con il terzo principio, che vengono così a rappresentare soltanto un'ulteriore garanzia per gli individui esposti. In una pratica appropriatamente ottimizzata raramente le dosi ricevute dai lavoratori potranno eccedere una modesta frazione dei limiti individuali raccomandati.

Per quanto riguarda questi ultimi, conviene qui riportare soltanto i più significativi di essi, per i lavoratori esposti e per le persone del pubblico.



Sono classificati lavoratori esposti i soggetti che, in ragione della attività lavorativa svolta per conto del datore di lavoro, sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore ad uno dei limiti di cui al punto 15.5.

### **18.1. Limiti per i lavoratori esposti:**

- 100 mSv in 5 anni per l'equivalente di dose per esposizione globale e per l'equivalente di dose efficace, ma non più di 50 mSv in un anno solare;
- 13 mSv in un trimestre solare per l'equivalente di dose all'addome nel caso delle lavoratrici in età fertile;
- 150 mSv/anno per l'equivalente di dose al cristallino;
- 500 mSv/anno per l'equivalente di dose alla pelle;
- 500 mSv/anno per l'equivalente di dose a mani, avambracci, piedi, caviglie.

### **18.2. Limiti i lavoratori non esposti e per il pubblico:**

- 1 mSv/anno per l'equivalente di dose per esposizione globale e per l'equivalente di dose efficace;
- 15 mSv/anno per l'equivalente di dose al cristallino;
- 50 mSv/anno per l'equivalente di dose alla pelle;
- 50 mSv/anno per l'equivalente di dose a mani, avambracci, piedi, caviglie.

Nel caso dell'esposizione interna, la legge prevede anche limiti annuali di introduzione (ALI) dei vari radionuclidi nell'organismo umano, il cui rispetto garantisce quello dei sopra menzionati limiti primari di dose efficace. Qualora l'esposizione interna sia dovuta a inalazione, detti limiti di introduzione si devono intendere a loro volta rispettati se le concentrazioni in aria risultano inferiori ai pertinenti limiti derivati di concentrazione (DAC).

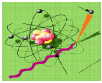
Il conseguimento degli obiettivi del sistema di protezione radiologica sopra descritto (prevenzione dei danni deterministici e limitazione degli eventi stocastici) sono demandati all'organizzazione della radioprotezione e in particolare alle azioni della sorveglianza fisica e medica della radioprotezione. La sorveglianza fisica viene assicurata tramite la figura dell'Esperto Qualificato, quella medica tramite il medico addetto alla sorveglianza medica (medico autorizzato, medico competente).

E' sempre possibile ottenere un'efficace protezione contro i rischi da radiazioni ionizzanti purché vengano opportunamente individuati e valutati quei fattori che nella protezione assumono importanza determinante.

In condizione di irradiazione esterna, in cui l'organismo viene irradiato da una sorgente esterna più o meno vicina ad esso, la protezione può essere realizzata sia

- riducendo il tempo di esposizione alle radiazioni generate dalla sorgente
- interponendo tra la sorgente e l'organismo umano adeguate schermature
- aumentando la distanza delle persone dalla sorgente





Quando si utilizzano sorgenti radioattive non sigillate si presenta anche il pericolo di contaminazione radioattiva del personale, delle aree di lavoro, delle apparecchiature usate e degli ambienti limitrofi;

Sarà necessario adottare scrupolose precauzioni, quali l'uso di guanti, abiti protettivi ed eventualmente pinze per la manipolazione a distanza.

In ogni caso il numero dei lavoratori esposti dovrà essere limitato all'indispensabile per le esigenze dell'esercizio e dovranno essere osservate le prescrizioni di sicurezza, in relazione alla necessità di limitare, in conformità alle buone tecniche in uso, le dosi assorbite dai singoli.

## **19. CLASSIFICAZIONE DEI LAVORATORI ESPOSTI, DEGLI APPRENDISTI E DEGLI STUDENTI**

Il D.Lgs. 230/95, come peraltro già il D.P.R. 185/64, prevede diversi adempimenti di sorveglianza fisica e medica a seconda della categoria in cui i lavoratori esposti al rischio da radiazioni ionizzanti vengono classificati. La classificazione di radioprotezione è quindi un'operazione preliminare, indispensabile per una corretta programmazione delle azioni di radioprotezione, e come tale deve essere effettuata prima di adibire il personale alle attività con rischio da radiazioni.

La classificazione di radioprotezione deve essere formulata dall'Esperto Qualificato, tenuto conto di tutte le attività svolte dal lavoratore per conto del datore di lavoro. La classificazione di radioprotezione viene formulata per mezzo della scheda di radioprotezione sulla base delle condizioni di lavoro come definite dal datore di lavoro. La scheda di radioprotezione deve essere quindi compilata prima che il lavoratore sia adibito alle attività lavorative con rischio da radiazioni ionizzanti.

Sulla base del D.Lgs. 230/95, i lavoratori devono essere distinti in lavoratori esposti e lavoratori non esposti.

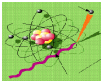
Sono classificati lavoratori esposti i soggetti che, in ragione dell'attività svolta per conto del datore di lavoro, sono suscettibili di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore ad uno qualsiasi dei limiti per le persone del pubblico.

Sono considerati lavoratori non esposti i soggetti sottoposti, in ragione dell'attività svolta per il datore di lavoro, ad una esposizione non superiore ad uno qualsiasi dei sopra riportati limiti fissati per le persone del pubblico.

### **I lavoratori esposti devono essere ulteriormente suddivisi in due categorie, A e B.**

Appartengono alla **categoria A** i lavoratori suscettibili di un'esposizione superiore a uno dei seguenti valori:

- 6 mSv/anno per esposizione globale o di equivalente di dose efficace
- i 3/10 di uno qualsiasi dei seguenti limiti:
  - 150 mSv/anno per il cristallino;
  - 500 mSv/anno per la pelle; se l'esposizione risulta da una contaminazione radioattiva cutanea, tale limite si applica all'equivalente di dose medio su qualsiasi superficie di 1 cm<sup>2</sup>.
  - 500 mSv/anno per mani, avambracci, piedi, caviglie.



I lavoratori esposti non classificati in categoria A sono classificati in **categoria B**.

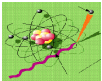
Nell'accertamento delle condizioni di appartenenza all'una o all'altra delle due categorie, l'Esperto Qualificato deve tenere conto anche delle esposizioni conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata, ma non delle esposizioni accidentali o di emergenza.

Il D.Lgs. 230/95 ha poi introdotto la categoria degli apprendisti e studenti esposti al rischio da radiazioni ionizzanti, che devono essere suddivisi in relazione all'età e al tipo di attività lavorativa o di studio nei seguenti gruppi:

- a) apprendisti e studenti, di età non inferiore a 18 anni, che si avviano a una professione nel corso della quale saranno esposti alle radiazioni ionizzanti, o i cui studi implicano necessariamente l'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti;
- b) apprendisti e studenti, di età compresa tra 16 e 18 anni, che si trovino nelle condizioni di cui alla precedente lettera a);
- c) apprendisti e studenti, di età non inferiore a 16 anni, che non si trovino nelle condizioni di cui alla precedente lettera a);
- d) apprendisti e studenti, di età inferiore a 16 anni.

Agli apprendisti e studenti di cui al precedente punto a) si applicano le stesse modalità di classificazione stabilite per i lavoratori. Possono quindi essere inclusi nelle categorie A e B dei lavoratori esposti o in quella dei lavoratori non esposti.

Per i lavoratori di cat. A sono previste la sorveglianza fisica individuale e la sorveglianza medica, con frequenza semestrale dei controlli, effettuata da parte del medico autorizzato. Per i lavoratori di cat. B, la sorveglianza fisica individuale può essere sostituita con quella ambientale e i controlli medici, effettuati dal medico autorizzato o dal medico competente, hanno frequenza annuale.



## CLASSIFICAZIONE DEGLI APPRENDISTI E STUDENTI

Apprendisti e studenti, di età non inferiore a 18 anni, che si avviano ad una professione nel corso della quale saranno esposti alle radiazioni ionizzanti, o i cui studi implicano necessariamente l'impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti

SONO EQUIPARATI AI LAVORATORI ESPOSTI

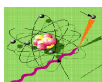
Apprendisti e studenti di età compresa tra 16 e 18 anni, che si trovino nelle condizioni precedenti

SONO EQUIPARATI AI LAVORATORI ESPOSTI DI CATEGORIA "B" CON IN PIU' ALCUNE PRESCRIZIONI PER LA CONTAMINAZIONE INTERNA

Apprendisti e studenti, di età non inferiore a 16 anni, che non si trovino nelle condizioni precedenti e apprendisti e studenti di età inferiore a 16 anni

I LIMITI DI DOSE SONO LA META' DI QUELLI PER IL PUBBLICO E OGNI SINGOLA ESPOSIZIONE NON PUO' SUPERARE UN VENTESIMO DEI VALORI ANNUALI PER L'IRRAGGIAMENTO GLOBALE ED UN CENTESIMO PER L'IRRAGGIAMENTO PARZIALE.





## CLASSIFICAZIONE DELLA POPOLAZIONE E LIMITI DI DOSE

LAVORATORI ESPOSTI	ESPOSIZIONE GLOBALE E EQ. DI DOSE EFFICACE	CRISTALLINO	PELLE	ESTREMITA'
-----------------------	---	-------------	-------	------------

### Categoria "A"

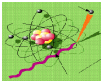
limite per 5 anni solari consecutivi	100 mSv			
limite massimo annuo	50 mSv	150 mSv	500 mSv	500 mSv

### Categoria "B"

limite annuo	6 mSv	45 mSv	150 mSv	150 mSv
--------------	-------	--------	---------	---------

PUBBLICO E LAVORATORI NON ESPOSTI	ESPOSIZIONE GLOBALE E EQ. DI DOSE EFFICACE	CRISTALLINO	PELLE	ESTREMITA'
---	---	-------------	-------	------------

limite annuo	1 mSv	15 mSv	50 mSv	50 mSv
--------------	-------	--------	--------	--------



### 19.1. Accesso alla "zona controllata" ed alla "zona sorvegliata"

Nel D.Lgs. 230/95 si parla di zone classificate per gli ambienti di lavoro sottoposti a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni ionizzanti. Le zone classificate possono essere zone controllate o zone sorvegliate .

È classificata zona controllata ogni area di lavoro ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei valori di cui al punto 15.7.

Tale zona deve essere sempre delimitata e segnalata da regolamentari cartelli indicanti il pericolo da radiazioni ionizzanti. La delimitazione può avvenire con opportune barriere fisiche, oppure con contrassegni sul pavimento. All'ingresso della zona devono essere affisse le norme interne, l'elenco delle persone autorizzate all'accesso ed il nome del responsabile della zona.

Nella zona controllata occorre indossare tutti i mezzi di protezione previsti: guanti, camice, cuffia, sovrascarpe.

Per zona sorvegliata si definisce ogni luogo alla periferia di una zona controllata, ovvero ogni luogo in cui sussista pericolo permanente di superare l'equivalente di dose massima ammissibile stabilito per l'insieme della popolazione.

Nell'accertamento delle condizioni di cui sopra, l'Esperto Qualificato deve tenere conto anche delle esposizioni conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata, ma non delle esposizioni accidentali o di emergenza.

L'individuazione e la classificazione delle aree ove sussiste rischio da radiazioni deve essere indicata per mezzo di relazione scritta al datore di lavoro ai sensi dell'art. 80, lettera a).

E' utile ricordare che, in aggiunta alle zone controllate e sorvegliate, nella sorveglianza operativa, si suole delimitare e regolamentare opportunamente anche le cosiddette zone interdette, aree ove i ratei di dose potrebbero raggiungere valori particolarmente elevati e per le quali è necessario istituire appropriate procedure di accesso. Dette zone sono usualmente presidiate da adeguati sistemi di sicurezza (microinterruttori sulle porte di accesso, controlli di ronda, etc.) allo scopo di impedire al personale di trovarsi al loro interno durante il funzionamento degli impianti.

Tipiche zone interdette sono le aree in cui passano i fasci primari e secondari degli acceleratori ovvero le aree in cui sono presenti importanti sorgenti radioattive.

Le zone controllate, sorvegliate e interdette sono segnalate mediante idonei cartelli di segnalazione posti in corrispondenza degli accessi.

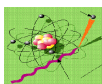
Nelle zone controllate ed in tutte le zone con pericolo di contaminazione è proibito:

- ☐ mangiare
- ☐ bere
- ☐ fumare
- ☐ applicare cosmetici

In detta zona non si debbono introdurre:

- ☐ cibi
- ☐ bevande
- ☐ sigarette
- ☐ tabacco o pipe
- ☐ oggetti personali che vengono spesso a contatto con le mani o del corpo





Tutti coloro che accedono nella "zona controllata" devono prendere conoscenza delle vigenti norme e rispettarle.

## **20. CLASSIFICAZIONE DEI LABORATORI E DEI REPARTI**

### **20.1. Tipi di laboratori e reparti**

I laboratori ed i reparti sono classificati di tipo 1, 2 o 3 in relazione all'attività ed alla radiotossicità dei radionuclidi in essi presenti o manipolati.

### **20.2. Laboratori di tipo 1**

Sono laboratori o reparti realizzati specificamente per manipolare sorgenti radioattive di attività e di radiotossicità di cui al prospetto 1.

Per questo tipo di laboratorio o reparto devono essere poste particolari attenzioni ai sistemi di sicurezza, di contenimento e di ventilazione dell'intero edificio in modo da stabilire un regime di depressione crescente andando dall'esterno verso l'interno del laboratorio dove il rischio di contaminazione è più alto.

### **20.3. Laboratori di tipo 2**

Sono laboratori o reparti dove si manipolano sorgenti radioattive di attività e di radiotossicità di cui al prospetto 1.

I criteri costruttivi riguardano in particolare i sistemi di ventilazione e di contenimento.

### **20.4. Laboratori di tipo 3**

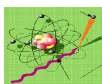
Sono laboratori dove si manipolano sorgenti radioattive di attività e di radiotossicità di cui al prospetto 1.

Nei laboratori di questo tipo i principi di protezione dalle radiazioni ionizzanti adottati riguardano principalmente la manipolazione delle sorgenti radioattive, il loro contenimento w/o la loro eliminazione.

### **20.5. Attività nei laboratori e reparti**

I valori di attività in funzione della radiotossicità, posti alla base della classificazione dei laboratori e dei reparti, sono indicati nel prospetto 1.

Nel caso di miscele di radioisotopi appartenenti a gruppi diversi di radiotossicità, si deve verificare che la somma dei rapporti tra le attività di ciascun radioisotopo componente la miscela e l'attività limite fissata per ciascuno di essi non sia maggiore di uno.



### Prospetto 1 - Criteri di classificazione dei laboratori e dei reparti

Gruppo di radioisotopi	Radiotossicità	Attività minima significativa	Tipo di laboratorio o di reparto		
			3	2	1
			Attività		
I	Molto elevata	3700 Bq (100 nCi)	≤370 kBq (≤10 µCi)	370 kBq -370 MBq (10 µCi-10 mCi)	> 370 MBq (> 10 mCi)
II	Elevata	37 kBq (1 µCi)	≤3700 kBq (≤100 µCi)	3700 kBq - 3700 MBq (100 µCi-100 mCi)	> 3700 MBq (> 100 mCi)
III	Moderata	370 kBq (10 µCi)	≤37 MBq (≤1 mCi)	37 MBq -37 GBq (1mCi-1Ci)	> 37 GBq (> 1Ci)
IV	Debole	3700 kBq (100 µCi)	≤370 MBq (≤10 mCi)	370 MBq –370 GBq (10mCi-10Ci)	> 370 GBq (> 10 Ci)

\*Al di sotto delle minime attività significative non si applicano i criteri di classificazione di tipo 1,2 e 3.

#### 20.6. Registro carico scarico elementi radioattivi

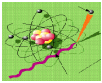
In base a quanto visto nei punti precedenti è estremamente importante non eccedere nell'acquisto e nella detenzione/manipolazione delle sostanze radioattive in quanto la progettazione di un reparto, di un laboratorio, di una stazione di lavoro adatta alla manipolazione di radioisotopi avviene a seguito di precise richieste ed esigenze, le quali, se dovessero mutare, dovranno essere tenute in considerazione per apportare le dovute modifiche od integrazioni là dove è possibile o la riprogettazione dell'intero reparto/laboratorio.

All'uopo **deve** essere istituito un registro per la registrazione del carico e dello scarico dei radioisotopi, il quale **deve** essere sempre tenuto aggiornato riportando non solo i tipi di radioisotopi detenuti con le attività di base e le quantità acquistate, ma anche il decadimento che, inevitabilmente, ciascun radioisotopo possiede.

A tal fine è possibile utilizzare un sistema informatizzato per il monitoraggio ed il controllo automatico del decadimento degli elementi radioattivi impiegati nei diversi laboratori. Tale supporto consente agli operatori di essere sempre a conoscenza dell'attività in ogni momento presente nel laboratorio, camera calda, reparto, ricevendo anche la segnalazione se ci si trova in condizioni oltre i limiti previsti a seconda di come è stato classificato il laboratorio.

Si ribadisce l'importanza di non eccedere nella detenzione delle attività al fine di rendere valide le protezioni personali e della struttura pensata per uno specifico impiego dei radioisotopi.

Il supporto informatico consente di seguire giorno per giorno il decadimento del singolo radioisotopo ed in base all'attività iniziale, stabilire il limite di attività massima che si può in quel momento acquistare e detenere. Inoltre, poiché vengono impiegati diversi tipi di radioisotopi, con radiotossicità differenti e tempi di decadimento diversi, il supporto SW consente di raggruppare



tutte le informazioni e di fornire una segnalazione dell'eventuale superamento dei limiti di detenzione previsti.

Tutte le singole operazioni di carico e di scarico devono essere registrate sul supporto informatico ponendo particolare attenzione a marcare i contenitori ove sono contenuti i diversi radioisotopi in quanto ciascuno elemento ha un proprio decadimento che deve essere singolarmente gestito.

## **21. MODALITÀ' DI DETENZIONE DELLE SORGENTI**

Vanno individuati in modo inequivocabile gli armadi e/o i frigoriferi dove sono conservati i preparati radioattivi. Tali armadi devono essere destinati unicamente alla conservazione dei preparati di cui trattasi.

Le sorgenti non più utilizzabili devono essere conservate a parte e gestite come "rifiuto radioattivo".

Il materiale radioattivo deve rimanere nel suo contenitore di trasporto finché non giunge nel laboratorio.

Qualora i preparati siano in forma liquida, è buona norma porre i contenitori su un vassoio in pvc o inox in modo da evitare la diffusione della contaminazione in caso di versamenti involontari o eventuale rottura del contenitore della sorgente.

### **21.1. Manipolazione del materiale radioattivo**

L'impiego di sorgenti non sigillate può esporre a contaminazione radioattiva e susseguentemente rischio di inalazione o ingestione o assorbimento cutaneo o introduzione attraverso ferite, di sostanze radioattive da parte del personale.

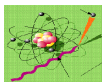
Le buone procedure di lavoro in un'installazione progettata secondo normative appropriate e riconosciute, mantengono normalmente la contaminazione nelle aree di lavoro a livelli sufficientemente bassi.

La contaminazione deve essere ridotta limitando i volumi e le superfici contaminabili e contenuta impedendo che sostanze o materiali contaminati si diffondano nei locali adiacenti a quelli in cui sono prodotti, tenuti o manipolati, o siano trasportati da correnti d'aria o dai movimenti di persone o di oggetti.

Nell'impiego di sostanze radioattive non sigillate è molto importante prestare attenzione ai rischi derivanti da irradiazione interna al personale (dovuta a inalazione o ingestione della sostanza). E' pertanto necessario ridurre al minimo il rischio di contaminazione del personale, delle aree e degli strumenti di lavoro. Ecco perché è bene che gli strumenti per la pulizia, compresi i guanti impermeabili, i camici, le sottoscarpe di plastica di tipo usa e getta, le scope, gli stracci ed i secchi, restino confinati all'interno di ogni camera calda, in modo da evitare inutili contaminazioni qualora se ne sia verificata la causa.

Si sottolinea quindi di:

- ☐ non usare le attrezzature delle zone con pericolo di contaminazione in altre zone
- ☐ non usare i frigoriferi, che normalmente contengono preparati radioattivi, per conservare cibi o bevande, e viceversa
- ☐ evitare di introdurre nelle zone di pericolo di contaminazione effetti personali come borse, pettini, cosmetici, etc.
- ☐ usare fazzoletti di carta al posto di quelli personali



- ❑ evitare assolutamente di toccare interruttori, telefoni, libri, riviste, tastiere di computers, etc. con le mani quando si indossano i guanti da lavoro
- ❑ i guanti, le sovrascarpe, i camici, ecc. devono essere tolti prima di uscire dal laboratori. Tali oggetti devono essere esaminati con gli appositi contaminametri prima di essere abbandonati
- ❑ non si deve introdurre nei laboratori oggetti non necessari
- ❑ cercare di contenere la contaminazione, in caso di spargimento di liquidi o polveri radioattive, avendo l'accortezza di allertare i preposti alla radioprotezione e di impedire l'ingresso alla zona di altre persone; non toccare o pulire i banconi o i pavimenti che possono presentare forme di liquidi sospetti. Il personale preposto effettuerà poi una valutazione della eventuale concentrazione superficiale di sostanze radioattive
- ❑ i rifiuti solidi devono essere deposti negli appositi contenitori contrassegnati
- ❑ i rifiuti liquidi attivi devono essere diluiti nei recipienti appositi
- ❑ la vetreria deve essere lavata nei soli lavandini del laboratorio
- ❑ i contenitori destinati alla raccolta giornaliera dei rifiuti non devono essere tenuti in luoghi di transito di personale non addetto all'impiego delle sostanze radioattive (come corridoi), per evitare esposizione indebita allo stesso. Detti contenitori devono essere gestiti con appositi pedali.
- ❑ le mani devono essere lavate dopo ogni permanenza nel laboratorio

## 21.2. Procedure di decontaminazione

Si premette che i processi di decontaminazione tendenti a rimuovere il materiale contaminante da una superficie contaminata non possono raggiungere efficienze del 100%, specialmente se intercorre parecchio tempo fra la contaminazione e le operazioni di decontaminazione: il tempo gioca infatti un ruolo determinante nella riuscita di qualsiasi processo di decontaminazione nel senso che, quanto più si ritarda il trattamento, tanto più diminuisce la possibilità di riuscita del trattamento stesso, in quanto tutti i fenomeni chimico-fisici, tendenti a legare stabilmente l'agente contaminante alla superficie contaminata, dipendono in misura notevole dal tempo di contatto: così ad esempio, superfici di vetro contaminate da lungo tempo, difficilmente potranno essere decontaminate, in dipendenza degli scambi cinetici intercorrenti fra il supporto ed il contaminante che, con il passare del tempo, fissano stabilmente l'isotopo contaminante.

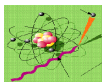
E' pertanto raccomandabile adottare tutte le precauzioni possibili per evitare lo spargimento di contaminazione radioattiva e, comunque, in caso di incidente, intervenire immediatamente con le conseguenti operazioni di bonifica.

E' inoltre opportuno ricordare che in generale, a parità di altri fattori, la decontaminazione dei vari materiali decresce secondo la sequenza:

- ❑ materie plastiche (teflon, PVC, polietilene, moplen, resine epossidiche e poliuretaniche, ect.)
- ❑ acciaio inossidabile
- ❑ acciaio al carbonio
- ❑ materiali non ferrosi
- ❑ alluminio

In altre parole si può affermare che in genere le superfici aventi una resistenza molto buona agli agenti chimici ed una struttura liscia e compatta hanno bassa contaminabilità e buona attitudine alla decontaminazione.

Si consiglia comunque, per questo motivo, per quanto possibile, di proteggere apparecchiature e superfici suscettibili di essere contaminate.



Come suggerimenti di carattere generale si citano le principali precauzioni da adottare, integralmente o parzialmente, durante ogni operazione di decontaminazione:

- ❑ assicurarsi dei sistemi di ventilazione
- ❑ impedire che il materiale contaminato venga a contatto con qualsiasi parte del corpo
- ❑ confezionare al più presto eventuali rifiuti prodotti o accumulati in imballi tali da impedire la fuoriuscita di polveri radioattive. Per questo scopo possono essere impiegati i normali materiali da imballo come carta, fogli di plastica, ecc.
- ❑ eventuali spills o versamenti liquidi devono essere assorbiti con materiali adatti: carta assorbente, argille assorbenti, segatura, vermiculite, cemento, ecc.
- ❑ limitare e segnalare l'estensione della contaminazione
- ❑ assicurarsi che le installazioni circostanti non corrano il rischio di essere contaminate proteggendole adeguatamente o allontanandole
- ❑ predisporre tutto il materiale necessario per l'operazione, al fine di non dover uscire dalla zona contaminata durante l'intervento
- ❑ verificare l'eventuale depressione ambientale
- ❑ controllare spesso il livello di radioattività ambientale ed eventuali contaminazioni residue
- ❑ indossare adeguati indumenti protettivi: camice, guanti, sovrascarpe, occhiali, maschere antipolvere, autorespiratori, ecc
- ❑ evitare di mangiare, bere, fumare o comunque portarsi le dita alla bocca
- ❑ togliere qualsiasi indumento che possa essere rimasto contaminato, lavarsi e controllarsi accuratamente, prima di allontanarsi da una zona contaminata
- ❑ in presenza di ferite contaminate sollecitare la fuoriuscita di sangue mediante pressione manuale intorno alla lesione o mediante l'impiego di ampole di aspirazione e contemporaneamente richiedere l'intervento del medico.

### **21.3. Tecniche di decontaminazione**

#### **21.3.1. Decontaminazione di superfici di lavoro ed attrezzature**

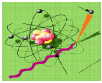
Qualsiasi operazione di decontaminazione dovrà essere preceduta da una esatta valutazione tecnico-economica che, tenendo conto dei rischi cui vengono sottoposti gli operatori, consenta di stabilire se il recupero dell'oggetto contaminato sia conveniente o meno.

Il recupero di oggetti od attrezzature potrà essere effettuato mediante la scelta di una delle soluzioni seguenti:

- ❑ attendere il decadimento naturale del contaminante (evidentemente tale metodo può essere applicato in rare occasioni ed in presenza di isotopi aventi un periodo di decadimento molto breve)
- ❑ fissare stabilmente l'agente contaminante alla superficie contaminata mediante vernici, colle adesive, mastici, ecc., onde impedire successive contaminazioni individuali (naturalmente la possibilità di applicazione di tale metodo sono limitate ai casi di debolissime contaminazioni superficiali tali da non creare nelle immediate vicinanze sensibili campi radioattivi)
- ❑ decontaminare il materiale, ossia rimuovere le sostanze radioattive dalle superfici contaminate e confinarle in maniera opportuna onde impedire successive contaminazioni.

Oggetto di ogni procedimento di decontaminazione è la rimozione degli agenti contaminanti, riducendo ad un livello accettabile la radioattività associata con l'oggetto contaminato ed





assicurandosi contemporaneamente che la contaminazione residua, anche se accettabile, non possa venire facilmente asportata.

Le operazioni che determinano le modalità di esecuzione di qualsiasi procedimento di decontaminazione dipendono da diversi fattori quali:

- ❑ il grado di contaminazione
- ❑ l'urgenza delle operazioni
- ❑ la natura della superficie contaminata
- ❑ il tempo intercorso
- ❑ il tipo di legame che si è instaurato tra la superficie ed il contaminante
- ❑ altri

In base a tali considerazioni è facile rilevare la complessità dei problemi connessi con una razionale applicazione delle varie tecniche di decontaminazione possibili. Infatti, a seconda dei vari parametri e modalità che influenzano il processo della contaminazione radioattiva, la decontaminazione fa appello a metodi diversi di trattamento il cui scopo finale è quello di rimuovere il contaminante lasciando, possibilmente, inalterata la superficie.

Tale risultato può essere raggiunto per via chimica mediante l'uso di appropriate miscele decontaminanti, oppure con processi puramente fisici come la raschiatura, la sabbiatura a secco e a umido, l'asportazione del materiale per via elettrolitica, ecc.

In pratica la difficoltà principale consiste nell'esatta individuazione del metodo più idoneo, al fine di conseguire un livello di decontaminazione accettabile senza alterare sostanzialmente la superficie e mantenendo i costi entro valori accettabili e commisurati al valore del prezzo da recuperare.

### **21.3.2. Decontaminazione individuale**

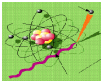
La decontaminazione deve avvenire sul posto dove si è manifestata la contaminazione. Dopo questo intervento l'interessato dovrà avvisare il preposto di radioprotezione, e se è il caso, l'esperto qualificato il quale provvederà alla valutazione dell'entità della contaminazione anche attraverso una eventuale raccolta di campioni biologici e darà ulteriori disposizioni sugli interventi e procedure di decontaminazione da eseguire.

In merito alla decontaminazione delle persone vengono di seguito riportati alcuni suggerimenti.

### **21.3.3. Decontaminazione della pelle**

Prima di ogni altra azione bisogna adottare le seguenti misure:

- ❑ verifica dell'assenza di ferite
- ❑ trattamento delle ferite prima del trattamento di decontaminazione nel caso di danno alla cute prodotto da contaminanti chimici
- ❑ verifica immediata del livello di contaminazione. Nel caso di livelli elevati può essere importante mettere una maschera al paziente ed al personale che lo assiste e rimuovere immediatamente il vestiario, eseguendo una decontaminazione rapida e grossolana per evitare una sovraesposizione al corpo intero; il vestiario rimosso andrà chiuso in sacchetto di plastica per essere trattato come rifiuto radioattivo



- ❑ in ogni caso vanno adottati tutti gli accorgimenti idonei a contenere il diffondersi della contaminazione.

#### **21.3.4. Contaminazione di un'area estesa della pelle**

L'interessato va sottoposto a doccia tiepida. Ove possibile, l'acqua utilizzata deve essere monitorata prima dello smaltimento. Dovrà essere utilizzato un sapone morbido, preferibilmente acido; il lavaggio deve avvenire dall'alto verso il basso. Quando il paziente è asciutto deve essere ricontrollato e, nel caso di contaminazione residua, si procede secondo le istruzioni contenute nel punto successivo

#### **21.3.5. Contaminazione residua**

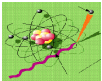
Se la contaminazione persiste dopo gli interventi sopra descritti, vanno usati dei decontaminanti più specifici:

- ❑ in presenza di terre rare, plutonio e transplutonici, lavare con soluzione di DTPA 1% (pH 3-5); strofinare delicatamente andando dal centro verso la periferia della zona contaminata. Se non è disponibile il DTPA usare una soluzione acquosa di HCl (pH1); se necessario ripetere più volte ma smettere se interviene un arrossamento della pelle
- ❑ in presenza di alcalini o alcalinoterrosi dovrebbe essere sufficiente il semplice lavaggio con acqua che, peraltro, può essere continuato a lungo; nel caso dello stronzio bisogna controllare attentamente che non siano presenti ferite, anche piccole; se ve ne sono va tenuta una insolubilizzazione locale dell'elemento (per es. con rodizonato di potassio)
- ❑ in presenza di uranio, lavare con una soluzione di bicarbonato di sodio
- ❑ in alcuni casi il materiale contaminante insolubile annidato in zone localizzate dello strato corneo della pelle può essere rimosso con carta abrasiva o nastro adesivo

##### **21.3.5.1. Mani**

In caso di contaminazione delle mani, effettuare nell'ordine i seguenti trattamenti:

- ❑ lavaggio accurato per circa 3' con acqua tiepida e sapone neutro esente da abrasivi e da additivi, usando uno spazzolino di setola morbida, soprattutto tra le dita e sotto le unghie, avendo cura di evitare eventuali abrasioni
- ❑ monitoring
- ❑ ripetere due volte le operazioni suddette
- ❑ se la cute è sottile: lavare per circa 5' con soluzione al 2% di bromuro di cetiltrimetilammonio (tipo Cetavlon) detergente cationico, dopo aver allontanato, con accurata risciacquatura, ogni traccia di sapone
- ❑ se la cute è spessa: lavaggio per 5' con detersivo in polvere miscelato con crusca o semola fine ed acqua, a formare una pasta (azione detergente, adsorbente, lievemente abrasiva) seguito da accurata risciacquatura
- ❑ monitoring
- ❑ ungere con creme a base di lanolina e, se la contaminazione persiste, fasciare o far indossare i guanti di filo



- controllare il giorno successivo e, se le condizioni della cute lo consentono, praticare ulteriori trattamenti di decontaminazione.

#### **21.3.5.2. Capelli**

La decontaminazione dei capelli va effettuata mediante prolungato e ripetuto shampooing, per esempio con una soluzione al 4% di Cetavlon che va versata sui capelli già bagnati e sui quali si deposita in pellicola, poi rimossa risciacquando con acqua; durante il lavaggio il capo va mantenuto reclinato su una adeguata bacinella proteggendo gli occhi con tamponi di ovatta; nei casi più gravi si dovrà procedere alla rasatura

#### **21.3.5.3. Naso**

Per la decontaminazione delle fosse nasali, utilizzare un irrigatore a bassa pressione munito di cannule di gomma morbida da inserire per circa 3 cm in ciascuna narice; tenere il capo inclinato su una bacinella e usare una soluzione di un composto chelante; inserire a lungo (10-15' ogni volta). Strofinare l'interno delle narici con dei bastoncini ovattati e monitorare l'eventuale contaminazione asportata

#### **21.3.5.4. Bocca**

La decontaminazione della bocca può essere effettuata con collutorio all'acqua ossigenata a 13 volumi; in casi eccezionali può essere necessario l'intervento dell'odontoiatra per rimuovere una contaminazione a carico dei denti

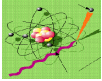
#### **21.3.5.5. Occhi**

Il primo e più importante intervento medico, consiste nel dilavare il prodotto nocivo irrorando l'area ustionata, con la massima rapidità possibile e con abbondanti quantità di acqua: un simile trattamento è, nella quasi totalità dei casi, in grado di limitare la gravità delle conseguenze, mentre anche un ritardo di pochi secondi, può risultare fatale.

Per la decontaminazione degli occhi usare soluzioni a pH appropriato al fine di neutralizzare l'azione caustica del materiale contaminante; in molti casi può essere opportuna la instillazione preliminare di una soluzione anestetica, per esempio collirio di cocaina al 2%. Al termine dei lavaggi potrebbe essere necessario prelevare un tampone faringeo per verificare l'eventuale contaminazione interna avvenuta tramite il canale naso-lacrimale.

Il trattamento di pronto soccorso relativo agli occhi deve risultare anch'esso immediato e consistere di irrigazioni prolungate dell'organo esposto, fatte con copiose quantità di acqua a bassa pressione, per non causare ulteriori danni dovuti a getti violenti d'acqua, provenienti da fontanelle, docce, canne per innaffiare o da qualsiasi contenitore: anche se la vittima indossa lenti a contatto, l'irrorazione deve iniziare al più presto possibile mentre i mezzi correttivi vengono rimossi, poiché un lievissimo ritardo nel soccorso può essere sufficiente a causare danni rilevanti, fino a giungere alla perdita della funzione visiva.

In tutti i casi, gli occhi devono essere subito esaminati da un medico specialista.



#### 21.3.5.6. Ferite

❑ **ferita sicuramente non contaminata ma associata a contaminazione di cute sana in zona adiacente**

Il trattamento sarà deciso caso per caso; quasi sempre però la lesione rappresenta l'elemento di maggior urgenza. In linea di massima i tempi successivi di intervento saranno i seguenti:

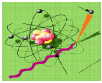
- protezione della zona contaminata con cerotto impermeabile o con medicazioni topiche al collodio
- trattamento medico chirurgico delle ferite
- monitoring della lesione e del materiale sanitario utilizzato (tamponi di garza, soluzioni disinfettanti, etc.)
- protezione impermeabile della lesione
- decontaminazione della zona cutanea attigua alle lesioni, previa rimozione del cerotto o del film protettivo, regolandosi come già detto
- ferita contaminata

❑ **Le ferite lievi**

Le ferite lievi, che sono anche le più frequenti nella pratica di laboratorio, vanno dalle semplici abrasioni alle lacerazioni e alle ferite di punta. Il trattamento è condizionato dall'agente contaminante e, in particolare, dal suo grado di solubilità nei liquidi dell'organismo: è quindi difficile fornire indicazioni valide per i vari casi. Uno schema di carattere generale, efficace principalmente quando si tratti di contaminanti insolubili può essere il seguente:

- ❑ far sanguinare abbondantemente la ferita, applicando eventualmente un laccio venoso
- ❑ irrigare a bassa pressione con soluzione fisiologica sterile o con soluzione di DaKin tiepida
- ❑ applicare un anestetico di superficie, per es. xilocaina al 4%
- ❑ monitoring
- ❑ se la contaminazione è circoscritta detergere meccanicamente con tamponcini di garza su pinza chirurgica
- ❑ monitoring (ferita, zone limitrofe, garze e soluzioni di lavaggio)





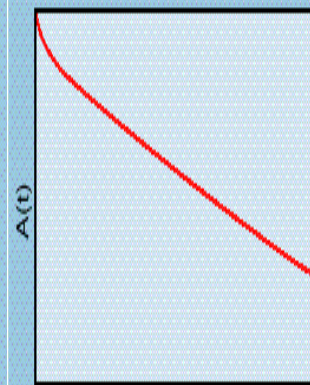
## IRRADIAZIONE INTERNA

INALAZIONE  
INGESTIONE  
FERITE CUTANEE  
ASSORBIMENTO TRANSCUTANEO

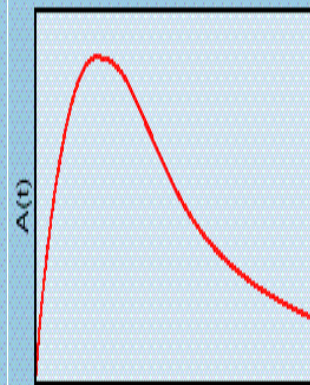
CARATTERISTICHE FISICHE DEL RADIONUCLIDE ( $t_{1/2}$ )  
SOLUBILITA' DELLA SOSTANZA INTRODOTTa  
METABOLISMO NEL CORPO UMANO  
AFFINITA' CHIMICA CON ALTRI ELEMENTI

IODIO → TIROIDE  
STRONZIO → OSSA  
PLUTONIO → OSSA, FEGATO

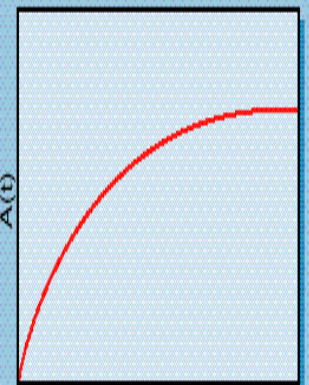
## ANDAMENTO NEL TEMPO DELL'ATTIVITA' TOTALE CORPOREA PER IL $^{137}\text{Cs}$



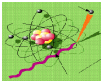
introduzione unica



introduzione prolungata



introduzione cronica



#### 21.4. Gestione dei rifiuti radioattivi

I rifiuti radioattivi sono un prodotto inevitabile quando si impiegano sorgenti radioattive non sigillate (cioè tali per cui nelle condizioni normali di impiego le sue caratteristiche non permettono di prevenire qualsiasi dispersione di materiale radioattivo e qualsiasi rischio di contaminazione. Può presentarsi in forma solida, liquida, gassosa). E' necessario quindi trattare tali rifiuti in modo che non diano luogo né ad un'irradiazione eccessiva, né ad un eventuale contaminazione dei lavoratori esposti e del pubblico.

Vi sono tre metodiche fondamentali con cui si possono trattare i rifiuti radioattivi:

- **eliminazione** nell'ambiente esterno nel rispetto dei limiti di smaltimento previsti dalla normativa vigente, qualora le quantità e le concentrazioni siano di entità minima (regime di esenzione)
- **immagazzinamento** in condizioni di sicurezza finché la loro attività non sia decaduta a livelli tali da consentire lo smaltimento nell'ambiente esterno
- **consegna** dei rifiuti ad una ditta o ad enti autorizzati allo smaltimento

I rifiuti radioattivi devono essere distinti in rifiuti liquidi e rifiuti solidi.

Sono da considerarsi *rifiuti liquidi* le soluzioni o sospensioni di sostanze radioattive, i liquidi di scintillazione, i liquidi di lavaggio e decontaminazione, le soluzioni residue non più utilizzate, le soluzioni impiegate per la decontaminazione, ecc.

Sono invece da considerarsi *rifiuti solidi* i materiali di uso corrente, quali le provette, pipette, puntali, guanti, carta, ecc.

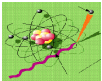
#### 22. STRUMENTI OPERATIVI DI SORVEGLIANZA FISICA DELLA RADIOPROTEZIONE

L'Esperto Qualificato è persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari per misurare le radiazioni ionizzanti, per assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione, per dare le istruzioni e le prescrizioni necessarie a garantire la sorveglianza fisica della radioprotezione.

In questa sua veste fornisce al datore di lavoro, prima dell'inizio di qualsiasi attività con rischio da radiazioni ionizzanti, una consulenza in merito alla valutazione dei rischi che l'attività comporta e ai relativi provvedimenti di radioprotezione da adottare, redigendo apposita relazione.

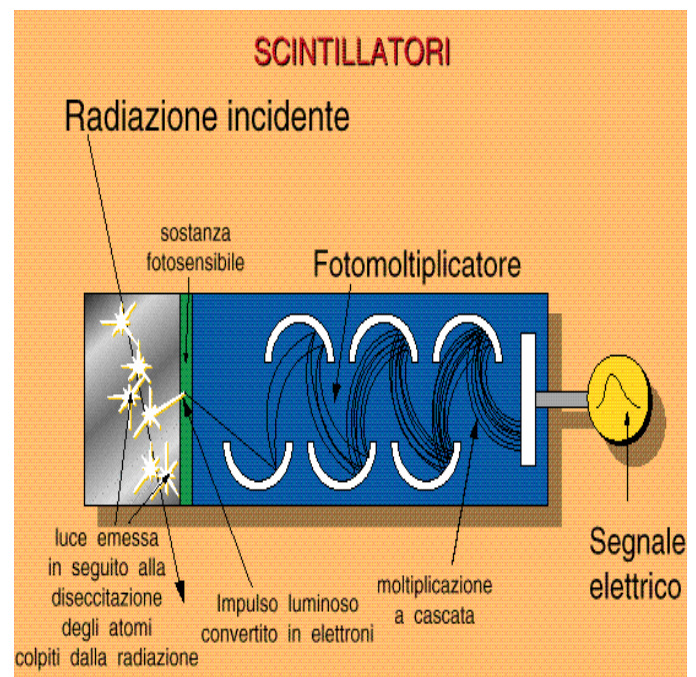
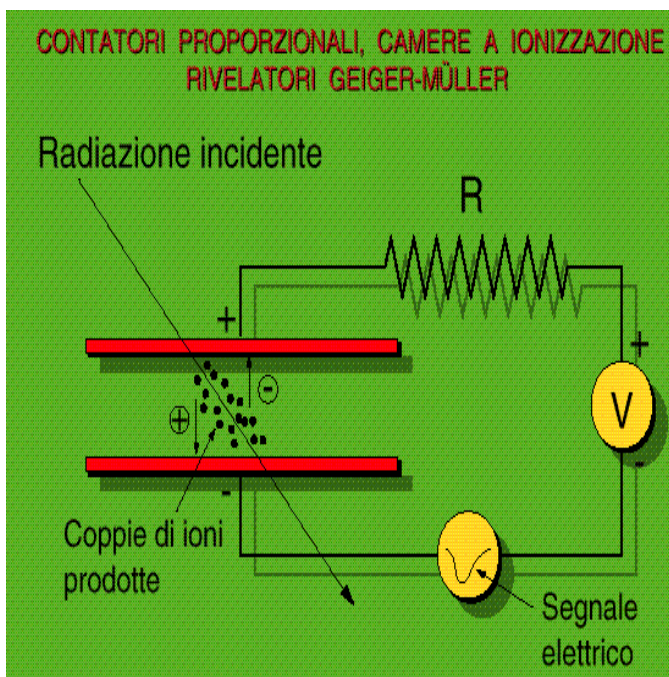
Rientrano tra le competenze dell'Esperto Qualificato una serie di fondamentali azioni organizzative generali, le principali delle quali riguardano:

- la classificazione delle aree con rischio da radiazioni ionizzanti;
- la classificazione del personale ai fini della radioprotezione;
- la predisposizione delle norme interne di radioprotezione;
- la segnalazione mediante contrassegni delle sorgenti di radiazione;
- la predisposizione di un programma di informazione e formazione, finalizzato alla radioprotezione, allo scopo di rendere il personale edotto dei rischi specifici a cui è esposto.

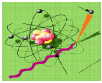


Nell'ambito dell'esercizio dei propri compiti, l'Esperto Qualificato deve poi:

- esaminare i progetti degli impianti, rilasciando il relativo benestare;
- provvedere ad effettuare il collaudo e la prima verifica degli impianti;
- verificare periodicamente l'efficacia dei dispositivi ovvero delle tecniche di radioprotezione;
- effettuare il controllo periodico del buon funzionamento della strumentazione di radioprotezione;
- effettuare la sorveglianza ambientale;
- valutare le dosi ricevute dai lavoratori e le introduzioni dei radionuclidi;
- procedere alla valutazione sia in fase di progetto che di esercizio delle dosi ricevute o impegnate dai gruppi di riferimento della popolazione, in condizioni normali di lavoro e nel caso di incidenti; - etc.







## **23. NORME INTERNE DI RADIOPROTEZIONE**

Le norme interne di radioprotezione sono lo strumento per mezzo del quale vengono disciplinate le attività radiologiche intorno a ciascun impianto o sorgente di radiazioni. In esse vengono in particolare specificate le regole da seguire per l'accesso e la permanenza nelle zone classificate ovvero per la manipolazione e l'utilizzo delle sorgenti radioattive. Vi sono inoltre descritti i sistemi di segnalazione, sicurezza ed emergenza, specificate le responsabilità dei dirigenti e dei preposti e illustrate le azioni da assicurare in condizioni di emergenza. Le norme interne sono predisposte dall'Esperto Qualificato ed emanate dal datore di lavoro. I lavoratori sono tenuti ad osservare le disposizioni in esse contenute.

## **24. LA DOSIMETRIA INDIVIDUALE**

Nel caso dell'irradiazione esterna, la valutazione della dose individuale ricevuta dai lavoratori viene di norma effettuata mediante dosimetri individuali, le cui letture vengono integrate con i risultati della dosimetria ambientale. Le norme interne di radioprotezione specificano le circostanze nelle quali detti strumenti sono obbligatori. I controlli di cui trattasi vengono abitualmente effettuati con varie apparecchiature: dosimetri a termoluminescenza (cards, chips, bulbi), dosimetri individuali a lettura diretta, dosimetri individuali elettronici, rivelatori a tracce, dosimetri a film, etc.

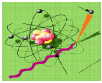
A proposito dell'uso pratico di questi strumenti conviene ricordare che essi devono essere indossati all'altezza del petto, salvo diversa indicazione da parte dell'Esperto Qualificato. E' consigliabile in linea di massima attaccarli al bavero del camice o di altro indumento ovvero tenerli nel taschino della giacca. Si ricorda inoltre che i dosimetri personali non devono mai essere lasciati sui tavoli di lavoro o altrove; non devono mai essere scambiati con quelli di altre persone o essere usati per scopi diversi da quelli per cui sono stati assegnati; al termine del lavoro, devono essere riposti nelle apposite bacheche; il loro eventuale smarrimento deve essere immediatamente segnalato all'Esperto Qualificato.

Conviene infine osservare che il portare un dosimetro di per sè non serve a prevenire l'esposizione alle radiazioni.

Tuttavia la conoscenza del dato dosimetrico consente di programmare opportunamente le successive esposizioni, in modo da mantenere la dose ricevuta da ciascun lavoratore quanto più bassa possibile e comunque al di sotto dei limiti stabiliti dalle vigenti leggi.

Nel caso dell'irradiazione interna, eventualità per la verità assai remota al momento attuale per i lavoratori operanti nella radiologia ma attuale per chi lavora con le sorgenti non sigillate, la valutazione della dose individuale potrà essere effettuata a partire dalla rivelazione delle radiazioni che eventualmente fuoriescono dal corpo umano, quando sufficientemente penetranti (per es. raggi gamma), ovvero a partire da misure di attività sugli escreti (urine e feci).





### **24.1. Tecniche di dosimetria**

Esistono diverse tecniche di dosimetria, cioè quella tecnica che si occupa di controllare e misurare periodicamente la dose assorbita dai lavoratori professionalmente esposti a radiazioni ionizzanti. Tra le più importanti si ricordano:

- ❑ film dosimetria
- ❑ penne dosimetriche tascabili
- ❑ dosimetri a filo di quarzo
- ❑ dosimetria a termoluminescenza

### **24.2. Film - dosimetria**

Il metodo è basato sulla dosimetria a mezzo emulsione sensibile.

La pellicola sensibile (in realtà due pellicole a sensibilità diverse: il tipo A ad alta sensibilità vale per le basse dosi - fino a 400 mR -, il tipo B a bassa sensibilità risponde bene per dosi elevate), di dimensioni 4x3 mm, avvolta in carta nera e racchiusa in una bustina di polivinile a tenuta di luce e di umidità, è inserita in un astuccio di bachelite all'interno del quale sono incollati, sulle due parti, filtri di rame, con spessori crescenti.

La radiazione incidente colpirà l'emulsione sensibile delle pellicole sia in corrispondenza della finestra circolare, sia dopo la filtrazione con gli spessori crescenti di rame (0,05 - 0,5 - 1,2 mm) e con uno spessore di piombo (0,5 mm) sfalsato sulle due facce per la stima della direzione di provenienza della radiazione. Dall'analisi degli annerimenti si giungerà alla determinazione della dose assorbita dalla pellicola in esame e, pertanto, a meno di utilizzazioni ed esposizioni non regolari, della dose assorbita dalla persona che l'ha portata nel periodo di controllo.

### **24.3. Penne dosimetriche tascabili**

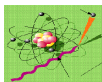
Si tratta di piccoli dosimetri tascabili, cui è stata data la forma esterna di una penna stilografica; possono essere a lettura diretta (dosimetri tascabili) o indiretta (camere tascabili individuali).

Le camere di ionizzazione tascabili sono generalmente di bachelite, rivestite internamente di grafite; lungo il loro asse è teso un filo di alluminio rivestito anch'esso di grafite. I due elettrodi sono rispettivamente: il filo all'interno del volume della piccola camera di ionizzazione e la camera stessa.

Fra i due elettrodi si stabilirà una differenza di potenziale tramite un apparecchio di carica; la radiazione che penetrerà nella camera, ionizzerà l'aria del volume sensibile, facendo diminuire la tensione tra gli elettrodi. La differenza con l'apparecchio di lettura tarato in mR o in R, rappresenterà la dose assorbita dalla camera di ionizzazione e, di conseguenza, dalla persona che l'ha portata.

### **24.4. Dosimetri a filo di quarzo**

Anch'essi sono delle vere penne dosimetriche; rispetto alle precedenti consentono di conoscere, ad ogni istante, la dose assorbita, senza dover ricorrere ad un elettrometro supplementare. Alcuni tipi non hanno neppure bisogno di uno speciale apparecchio per la carica.



L'elettrodo centrale è collegato ad un elettroscopio costituito da due parti: come parte fissa, un filo di rame grosso, di diametro di 0,6 mm circa, ripiegato a forcina; come parte mobile un filo di quarzo metallizzato di qualche micron di diametro, a contatto elettrico.

Quando con una sorgente elettrica si caricherà a 200 volt il filo di rame, il filo di quarzo verrà respinto da esso e si porterà in corrispondenza dello zero di una scala graduata che si tratterà in controluce da un'estremità della penna.

Se la penna verrà investita da un fascio di radiazioni, l'aria della camera di ionizzazione diventerà parzialmente conduttrice e farà diminuire la tensione, consentendo al filo di quarzo di avvicinarsi a quello di rame; il filo di quarzo, nel suo movimento di scarica, segnerà sulla scala micrometrica la sua variazione di potenziale rispetto a quello di rame. La scala, graduata in R, darà direttamente il valore della dose assorbita.

## 24.5. Dosimetria a termoluminescenza

Si basa sul fenomeno fisico del rilascio dell'energia immagazzinata dal materiale attraverso una precedente eccitazione del suo sistema elettronico.

La capacità di immagazzinamento, o se vogliamo, di memorizzazione dell'effetto di una precedente eccitazione, è di fondamentale importanza nella dosimetria a termoluminescenza ed è associata alla presenza, nel solido, di impurità strutturali.

I materiali che interessano la dosimetria a termoluminescenza sono dei cristalli isolanti nei quali gli elettroni di conduzione sono dovuti interamente all'energia assorbita, per esempio tramite radiazione ionizzante. Esempi di tali isolanti sono gli alogenuri alcalini, come il fluoruro di litio (LiF) ed il cloruro di sodio.

Un cristallo è un agglomerato di atomi, o molecole, caratterizzato da una periodicità tridimensionale. Una perfetta periodicità della posizione degli atomi non è possibile a causa delle vibrazioni termiche degli atomi stessi. Inoltre le dimensioni finite del cristallo causano una discontinuità e quindi un primo difetto nella struttura cristallina.

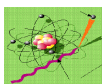
Un cristallo senza difetti è chiamato ideale. Un cristallo la cui periodicità sia disturbata dalle sole vibrazioni termiche è invece chiamato perfetto; infine, un cristallo finito, con probabili altri difetti, è un cristallo reale. Solo un cristallo reale possiede quelle interessanti proprietà quali la colorazione, la fotoconducibilità e la luminescenza.

L'esistenza delle imperfezioni nei cristalli ha un'importante conseguenza quando il cristallo è sottoposto ad una radiazione ionizzante. Infatti i difetti possono agire come trappole per i portatori di carica generati dalle particelle secondarie durante l'irraggiamento. Un centro formato da un elettrone intrappolato in una vacanza ionica (trappola) negativa presenta livelli energetici discreti, tra i quali sono permesse transizioni con assorbimento od emissione di appropriata energia. Queste imperfezioni prendono il nome più appropriato di "centri di colore", poiché sono appunto responsabili della diversa colorazione dei cristalli.

Il fenomeno della termoluminescenza avviene secondo due fasi ben precise:

1. ionizzazione ed intrappolamento
2. ricombinazione di elettroni e lacune con emissione di luce.

Durante la fase di irraggiamento si ha la produzione di elettroni e lacune; gli elettroni si muovono nella banda di conduzione sino a che non vengono intrappolati nei difetti o ricadono nella banda di valenza con ricombinazione radiativa (fluorescenza) o non radiativa con le lacune. La terza



possibilità è che essi siano catturati da centri luminescenti già attivati da lacune a causa della radiazione: ciò comporta la disattivazione del centro con emissione luminosa (radioluminescenza).

L'effetto del riscaldamento del materiale è tale per cui gli elettroni intrappolati nei livelli metastabili hanno ricevuto una sufficiente energia termica per sfuggirne e ritornare alla banda di conduzione, ove sono liberi di muoversi fino a che:

1. gli elettroni non cadono nella banda di valenza e si ricombinano radiativamente o non con le lacune
2. gli elettroni si ricombinano radiativamente con centri luminescenti attivati da lacune

Nel caso 2 si parla di termoluminescenza.

### 24.5.1. Il servizio di dosimetria

La dosimetria a termoluminescenza (TLD) attualmente in uso presso il servizio di radioprotezione dell'Università "Tor Vergata", si basa sulle proprietà termoluminescenti dei cristalli di fluoruro di litio drogati al magnesio, rame e fosforo (LiF:Mg, Cu, P) confezionati in dischetti del diametro di 4,5 mm ed altezza di 0,8 mm ("chips") noti col nome commerciale GR-200 A.

La luce emessa dalla chip viene rilevata da un tubo fotomoltiplicatore e, tenuto conto della sensibilità del lettore valutata tramite lettura di chips di controllo sottoposte a una irradiazione nota, e della sensibilità intrinseca relativa (SIR) del singolo elemento, si ottiene la dose delle radiazioni ionizzanti (la causa dell'eccitazione del suo sistema elettronico) assorbita dalla singola chip.

Le chip possono essere riutilizzate più volte ed è possibile calcolare con accettabile precisione i cambiamenti del loro comportamento in seguito al tempo e all'uso. Non è però possibile ripetere la stessa lettura in quanto in seguito al riscaldamento il dosimetro, restituita l'energia precedentemente assorbita, si trova reinizializzato (annealing).

Le chip sono confezionate in contenitori di plastica che possono alloggiare fino a quattro elementi, a loro volta contenuti in buste di plastica termosaldate che possono essere disposte negli ambienti di lavoro o indossate dai lavoratori radioprotetti, al petto o a bracciale.

I dosimetri adottati dal nostro servizio contengono tre elementi, differentemente filtrati (al rame, all'alluminio, non filtrato). Dalla correlazione delle letture dei tre elementi è possibile determinare la dose assorbita dal dosimetro e anche la natura della radiazione assorbita.

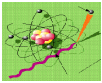
Il sistema di dosimetria si basa sull'uso di tre differenti categorie di dosimetri: **Ambientali**, **Personalì**, **Testimoni**.

Affinché i dati della dosimetria siano significativi ai fini della radioprotezione dei lavoratori, dal momento che il calcolo della dose è elaborato in base alla correlazione delle letture delle diverse categorie di dosimetri, è necessario che i tre tipi di dosimetri siano correttamente utilizzati e tempestivamente riconsegnati alla struttura. La tardiva riconsegna di un dosimetro personale rende arduo commisurare le sue letture agli ambientali e al testimone; la tardiva o omessa riconsegna del testimone rende arbitraria la valutazione dell'intero gruppo di dosimetri ad esso relativi.

I dosimetri "**ambientali**" restituiscono le radiazioni emesse nell'ambiente nel dato periodo. Devono essere opportunamente disposti nei pressi dei punti di frazionamento o delle macchine radiogene, a seconda della natura delle sorgenti.

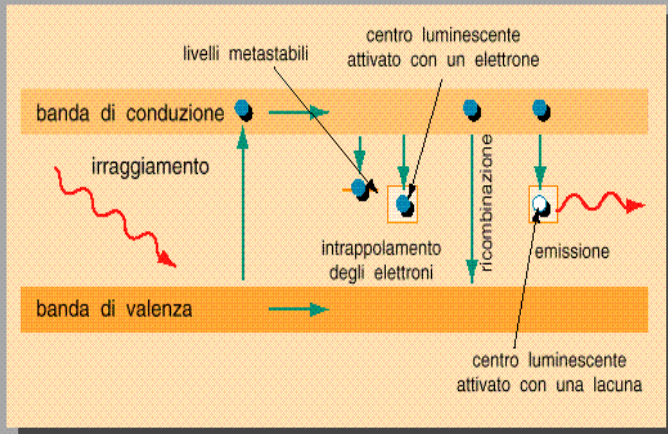
I dosimetri "**personalì**" vengono indossati dai lavoratori radioprotetti, e restituiscono la dose assorbita dalla persona che li indossa. Devono essere sempre indossati all'interno delle camere calde o laboratori, ma conservati all'esterno di esse quando non sono adoperati.

I dosimetri "**testimoni**" indicano la dose assorbita da tutto il set dei dosimetri a cui fanno riferimento per cause non dipendenti dal loro utilizzo, prima fra tutte la radioattività naturale, che varia da luogo a luogo in dipendenza di vari fattori. Devono essere tenuti insieme ai personali e agli

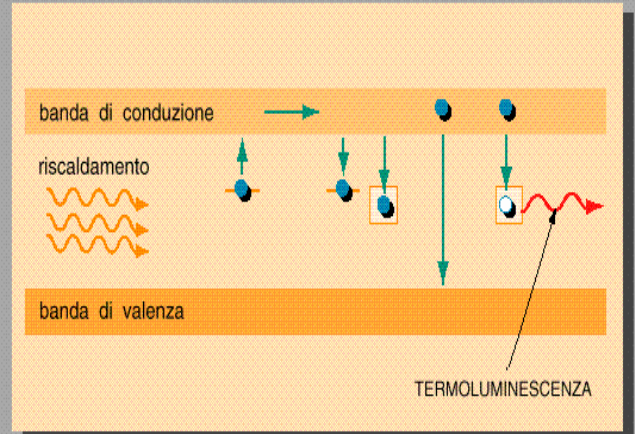


ambientali durante la conservazione e il trasporto, ma custoditi all'esterno della camera calda o laboratorio.

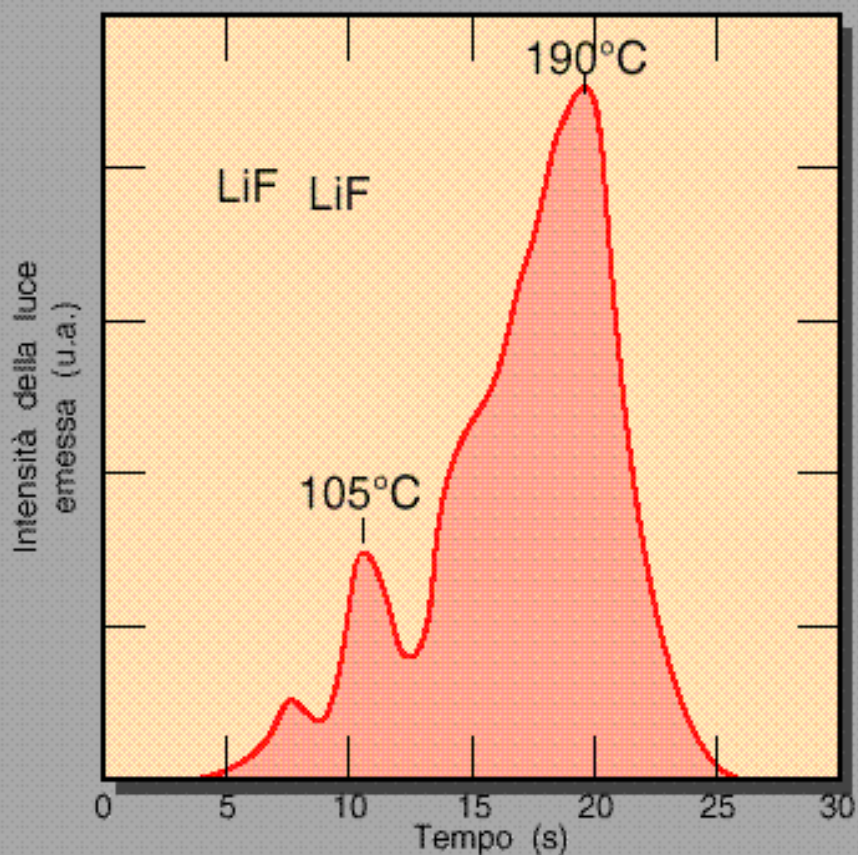
### TERMOLUMINESCENZA (fase dell'irraggiamento)



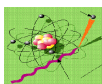
### TERMOLUMINESCENZA (fase del riscaldamento)



### TERMOLUMINESCENZA "GLOW CURVE"







## 24.6. Norme procedurali per l'uso dei dosimetri

Si ricorda che:

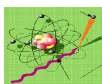
- I dosimetri denominati “Ambientali” vanno posizionati nelle vicinanze dei punti di lavoro delle macchine radiogene (Diffratometro, microscopi elettronici, etc.) e/o delle sorgenti radioattive sigillate e non sigillate. Eventuali consigli sul corretto posizionamento possono essere direttamente richiesti all'Esperto Qualificato.
- I dosimetri denominati “Testimoni” vanno posizionati in zona diversa dai punti di lavoro sopra richiamati. E' consigliabile tenere i “Testimoni” in zona ufficio.
- I dosimetri “Personal” vanno **sempre** impiegati durante l'orario di lavoro e custoditi, durante i periodi di non utilizzo, possibilmente nella stessa zona dove sono conservati i dosimetri “Testimoni”. Si consiglia a tale scopo, di programmare l'utilizzo di un apposito contenitore con spazi predisposti per il deposito di tutti i dosimetri “Testimoni” e “Personal”.

Per una corretta gestione del servizio di dosimetria, si ricorda a tutto il personale radioprotetto, che:

- i dosimetri debbono essere riconsegnati, per una loro lettura, tutti alla data stabilita (entro massimo 5 giorni del mese successivo al termine della validità del dosimetro). Si presente che una mancata tempestiva consegna dei dosimetri comporta l'assoluta impossibilità di eseguire le valutazioni relative all'esposizione del personale stesso e quindi ritardi negli eventuali interventi correttivi che si rendessero necessari.
- risulta tassativo consegnare tutti i dosimetri insieme ai “Testimoni” ed “Ambientali” onde evitare errori nella valutazione derivanti da tempi diversi di esposizione all'irraggiamento.
- Nel caso di **eventuale smarrimento** del dosimetro il responsabile del Laboratorio **deve** richiedere per iscritto la sostituzione del dosimetro smarrito, fermo restando che nel periodo transiente non sarà possibile fornire il servizio di lettura.
- Occorre **sempre comunicare** per iscritto e tempestivamente tutte le variazioni del personale radioprotetto sia come aggiunte che come cessazione, comprese eventuali temporanee assenze prolungate.
- Si ricorda che è obbligatorio da parte del personale radioprotetto fornire con cadenza massimo semestrale, le eventuali esposizioni a radiazioni ionizzanti assorbite in altri luoghi di lavoro.

## 25. GESTIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

I rifiuti radioattivi sono un prodotto inevitabile quando si impiegano sorgenti radioattive non sigillate, cioè tali per cui nelle condizioni normali di impiego le loro caratteristiche non permettono di prevenire qualsiasi dispersione di materiale radioattivo e qualsiasi rischio di contaminazione. I rifiuti possono presentarsi in forma solida o liquida. E' necessario quindi trattare tali rifiuti in modo che non diano luogo né ad un'irradiazione eccessiva, né ad un eventuale contaminazione dei lavoratori esposti e del pubblico.



Vi sono tre metodiche fondamentali con cui si possono trattare i rifiuti radioattivi:

- eliminazione nell'ambiente esterno nel rispetto dei limiti di smaltimento previsti dalla normativa vigente, qualora le quantità e le concentrazioni siano di entità minima (regime di esenzione)
- immagazzinamento in condizioni di sicurezza finché la loro attività non sia decaduta a livelli tali da consentire lo smaltimento nell'ambiente esterno
- consegna dei rifiuti ad una ditta o ad enti autorizzati allo smaltimento

I rifiuti radioattivi devono essere distinti in rifiuti liquidi e rifiuti solidi.

Sono da considerarsi rifiuti liquidi le soluzioni o sospensioni di sostanze radioattive, i liquidi di scintillazione, i liquidi di lavaggio e decontaminazione, le soluzioni residue non più utilizzate, le soluzioni impiegate per la decontaminazione, ecc.

Sono invece da considerarsi rifiuti solidi i materiali di uso corrente, quali le provette, pipette, puntali, guanti, carta, ecc.

### **25.1. Smaltimento dei rifiuti radioattivi**

Nel caso non sia possibile, dato il tipo dei radioisotopi utilizzati (per es. carbonio-14 e trizio), aspettare il naturale decadimento degli stessi, i rifiuti prodotti presso il laboratorio devono essere periodicamente smaltiti tramite una ditta specializzata ed autorizzata.

### **25.2. Deposito rifiuti radioattivi**

In attesa del ritiro dei rifiuti secondo le modalità contrattuali stabilite con la ditta, gli stessi devono essere immagazzinati temporaneamente in un locale all'uopo destinato.

In detto locale devono essere sistemati un numero idoneo di fusti metallici a tenuta, regolarmente numerati, per l'immagazzinamento dei rifiuti solidi e liquidi contaminati da materiale radioattivo. All'interno del deposito deve essere altresì installata una scaffalatura per la raccolta e la sistemazione dei fusti.

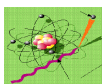
I fusti e i bidoni, destinati alla raccolta dei materiali di rifiuto, devono essere tali da non permettere fuoriuscita del contenuto contaminato.

I rifiuti solidi, prima di essere sistemati nei relativi fusti metallici, dovranno essere sigillati in opportuni sacchi di polietilene saldati a tenuta, mentre quelli liquidi verranno raccolti in opportuni contenitori di plastica chiusi a tenuta. All'ingresso del deposito rifiuti dovrà essere affisso un regolamentare cartello indicante pericolo da radiazioni e recante la dicitura "zona controllata o sorvegliata".

La porta d'ingresso deve essere chiusa a chiave e la chiave deve essere custodita dal responsabile.

L'accesso al deposito dovrà avvenire solo usando soprascarpe a perdere, custodite in un apposito stipetto e da indossare prima dell'ingresso nella zona.

L'ingresso è consentito solo al personale autorizzato. Il personale che accede a detto locale deve prendere visione delle norme interne di comportamento e rispettarle.



### **25.3. Gestione quotidiana dei rifiuti radioattivi**

Alla fine della giornata lavorativa i rifiuti giornalmente prodotti e raccolti negli appositi sacchi e bottiglioni devono essere trasportati nel deposito e debitamente sistemati nei loro contenitori. Questo trasporto deve essere effettuato con le opportune cautele al fine di evitare contaminazione sia del personale addetto che dell'ambiente.

Il trasporto dei sacchi e dei bottiglioni dovrà avvenire tramite un piccolo carrello. Gli stessi dovranno essere ricoperti con fogli di carta assorbente, da eliminare a trasporto avvenuto come rifiuto solido, così da evitarne la contaminazione.

Il personale addetto al trasporto dovrà indossare gli indumenti protettivi. Le soprascarpe indossate nel laboratorio dovranno essere qui abbandonate, per evitare durante il trasporto la contaminazione del suolo; all'ingresso del deposito ne verranno indossate di nuove.

### **25.4. Contenitori dei rifiuti radioattivi**

I rifiuti radioattivi prodotti nel laboratorio dovranno essere raccolti e suddivisi in diversi contenitori. I contenitori dei rifiuti radioattivi solidi sono di norma fusti metallici muniti di coperchio asportabile con guarnizione a tenuta e cravatta di chiusura per l'applicazione del sigillo e sono dotati di saccone di plastica da sigillare a riempimento avvenuto.

E' importante porre la massima attenzione al confezionamento dei rifiuti appuntiti, taglienti, o comunque suscettibili di provocare tagli e rotture del saccone di plastica, contenuto nel bidone (ad esempio, avvolgere in carta o fogli di alluminio materiali vetrosi taglienti, ecc.).

I rifiuti radioattivi solidi devono contenere solamente minime quantità di liquidi e quindi tutti i recipienti da eliminare vanno vuotati accuratamente e, ove possibile, devono essere tappati.

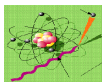
I rifiuti radioattivi liquidi verranno versati in appositi bottiglioni a "bocca larga" con tappo a vite (normalmente forniti dalla ditta autorizzata al prelievo).

I contenitori dei rifiuti radioattivi devono essere separati da quelli dei rifiuti convenzionali.

### **25.5. Etichettatura dei contenitori dei rifiuti**

Ogni contenitore, una volta riempito, deve portare a carattere permanente e in posizione ben visibile le seguenti indicazioni:

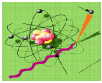
- segnale di pericolo da radiazioni ionizzanti
- numero e sigla di riconoscimento, che devono essere uguali a quello dello schedario
- classificazione del contenitore
- data del suo ultimo riempimento
- tipo di radioisotopo contenuto
- intensità massima di equivalente di dose (mrem/h, mSv/h) rilevata a contatto del contenitore, alla data dell'ultimo riempimento
- massa finale del contenitore



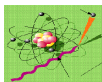
## 26. GLOSSARIO

- **ALI:** limite derivato per la quantità di un dato radionuclide che può essere introdotta nell'organismo per inalazione o ingestione in un anno (Bq/anno).
- **ALARA** (As Low As Reasonably Achievable): procedura per tenere le dosi ricevute dai lavoratori e dal pubblico le più basse possibili, tenendo conto dei fattori economici e sociali.
- **Attivazione:** processo di produzione di un materiale radioattivo tramite bombardamento con neutroni, protoni o altre particelle.
- **Attività:** numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide che si producono nell'unità di tempo; si esprime in Bq.
- **Becquerel (Bq):** unità di misura dell'attività; 1 Bq = 1 disintegrazione al secondo.
- **Contaminazione radioattiva:** contaminazione di una matrice, di una superficie, di un ambiente di vita o di lavoro o di un individuo, prodotta da sostanze radioattive.
- **DAC:** limite derivato per la concentrazione in aria di uno specificato radionuclide (Bq.cm<sup>-3</sup>).
- **Dose assorbita:** energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti per unità di massa di materiale irraggiato; si esprime in Gray.
- **Equivalente di dose:** prodotto della dose assorbita in tessuto per il fattore di qualità; si esprime in sievert.
- **Equivalente di dose efficace:** somma del prodotto degli equivalenti di dose ricevuti da specifici organi del corpo umano per gli appropriati fattori di ponderazione; si esprime in sievert.
- **Equivalente di dose (efficace) impegnato:** equivalente di dose (efficace) ricevuto da un organo o tessuto, in un determinato periodo di tempo, in seguito all'introduzione di uno o più radionuclidi.
- **Esperto Qualificato:** persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari sia per effettuare misurazioni, esami, verifiche o valutazioni di carattere fisico, tecnico o radiotossicologico, sia per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di radioprotezione, sia per fornire tutte le altre indicazioni e formulare provvedimenti atti a garantire la sorveglianza fisica della protezione dei lavoratori e della popolazione. La sua qualificazione è riconosciuta secondo procedure stabilite per legge.
- **Esposizione:** qualsiasi esposizione di persone a radiazioni ionizzanti.
- **Esposizione esterna:** esposizione prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo.
- **Esposizione interna:** esposizione prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo.
- **Esposizione globale:** esposizione, considerata omogenea, del corpo intero.





- **Esposizione parziale:** esposizione che colpisce soprattutto una parte dell'organismo o uno o più organi o tessuti, oppure considerata non omogenea.
- **Fattore di ponderazione di un organo o tessuto:** frazione del rischio stocastico, risultante da un'irradiazione uniforme del corpo, attribuibile all'organo o tessuto considerato.
- **Fattore di qualità:** fattore per il quale si moltiplica la dose assorbita in tessuto per tener conto della qualità della radiazione.
- **Fondo naturale di radiazioni:** insieme delle radiazioni ionizzanti provenienti da sorgenti naturali, terrestri e cosmiche, sempre che l'esposizione che ne risulta non sia accresciuta in modo significativo da attività umane.
- **Gray:** unità di misura della dose assorbita;  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ .
- **Introduzione:** attività introdotta nell'organismo dall'ambiente esterno.
- **Irradiazione esterna:** vedere esposizione esterna.
- **Irradiazione interna:** vedere esposizione interna.
- **Lavoratori esposti:** persone sottoposte, per l'attività che svolgono, a un'esposizione che può comportare dosi superiori ai pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico.
- **LET:** energia ceduta dalle particelle cariche per unità di percorso.
- **Limiti di dose:** limiti fissati per le dosi riguardanti l'esposizione dei lavoratori esposti, degli apprendisti, degli studenti e delle persone del pubblico, per le attività disciplinate dal D.Lgs. 230/95. I limiti di dose si applicano alla somma delle dosi ricevute per esposizione esterna nel periodo considerato e delle dosi impegnate derivanti dall'introduzione di radionuclidi nello stesso periodo.
- **Materia radioattiva:** sostanza o insieme di sostanze radioattive contemporaneamente presenti.
- **Matrice:** qualsiasi sostanza o materiale che può essere contaminato da materie radioattive; sono ricomprese in tale definizione le matrici ambientali e gli alimenti.
- **Medico autorizzato:** medico responsabile della sorveglianza medica dei lavoratori esposti, la cui qualificazione e specializzazione sono riconosciute secondo le procedure e le modalità stabilite dalla legge.
- **Persone del pubblico:** individui della popolazione esclusi i lavoratori, gli apprendisti e gli studenti esposti in ragione della loro attività.
- **Radiazioni ionizzanti:** radiazioni costituite da fotoni o da particelle aventi la capacità di determinare direttamente o indirettamente la formazione di ioni.



- **Radioattività:** processo naturale attraverso il quale gli atomi instabili di un elemento emettono l'energia in eccesso da parte dei nuclei trasformandosi in atomi di un diverso elemento o in stati energetici di minor energia dello stesso elemento.
- **Sievert:** unità di misura dell'equivalente di dose e dell'equivalente di dose efficace;  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ .
- **Sorgente di radiazioni:** apparecchio generatore di radiazioni ionizzanti (macchina radiogena) o materia radioattiva, ancorché contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, dei quali, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività, o la concentrazione di radionuclidi, o l'emissione di radiazioni.
- **Sorgente sigillata:** sorgente formata da materie radioattive solidamente incorporate in materie solide e di fatto inattive, o sigillate in un involucro inattivo che presenti una resistenza sufficiente per evitare, in condizioni normali di impiego, dispersione di materie radioattive superiore ai valori stabiliti dalle norme di buona tecnica applicabili.
- **Sorgente non sigillata:** qualsiasi sorgente che non corrisponde alle caratteristiche o ai requisiti della sorgente sigillata.
- **Sorveglianza medica:** l'insieme delle visite mediche, delle indagini specialistiche e di laboratorio, dei provvedimenti sanitari adottati dal medico, al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori esposti.
- **Sorveglianza fisica:** l'insieme dei dispositivi adottati, delle valutazioni, delle misure e degli esami effettuati, delle indicazioni fornite e dei provvedimenti formulati dall'Esperto Qualificato al fine di garantire la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione.
- **Sostanza radioattiva:** ogni specie chimica contenente uno o più radionuclidi di cui, ai fini della radioprotezione, non si può trascurare l'attività o la concentrazione.
- **Zona controllata:** ambiente di lavoro, sottoposto a regolamentazione per motivi di protezione dalle radiazioni ionizzanti, in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento in un anno solare dei 3/10 di uno qualsiasi dei valori dei limiti per i lavoratori esposti, e in cui l'accesso è segnalato e regolamentato.
- **Zona sorvegliata:** ambiente di lavoro in cui può essere superato in un anno solare uno dei pertinenti limiti fissati per le persone del pubblico e che non è zona controllata.

Note di riferimento da "Opuscolo d'informazione per i lavoratori dell'INFN"

di A. Esposito, E. Giroletti, G. Moschini, M. Pelliccioni, E. Righi

ENEA – "Elementi di radioprotezione" – Carlo Polvani

Ugo Amaldi "Fisica delle Radiazioni" BORINGHERI

CNEN – "Manuale di protezione dalle radiazioni ionizzanti"

CNEN – "Elementi di Fisica Sanitaria"

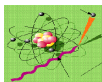
E. Casnati – "Ionizing Radiation Metrology"

CNR – "Protezione e sicurezza del lavoro nei laboratori scientifici"

ENPI - "Raggi X – Protezione, Dosimetria, Prevenzione" A. Venier

**Corso sulla protezione dalle radiazioni ionizzanti - Anno 2000**

**A cura degli Esperti Qualificati Dott. Ing. Aldo DELIA - Dott. Ing. Giovanni CALISESI**



## CORSO SULLA PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI IONIZZANTI

**D.lgs 230/95, l'Art. 61, comma 3, lettera e) del D.Lgs 230/95 (D. Lgs 17 marzo 1995 -  
Supplemento G.U. n° 136 del 23/06/1995) – e del dall'articolo 21-22 del D.Lgs. 626/94**

L'Azienda .....ai sensi e per quanto previsto dall'articolo  
21-22 del D.Lgs. 626/94 e dell' Art. 61 D.Lgs. 230/95, al termine del corso di informazione tenutosi  
in data ....., ha consegnato al dipendente Sig.....  
il libretto informativo e formativo della radioprotezione in azienda.

Firma del lavoratore .....

(per avvenuta consegna del libretto informativo e per avvenuta partecipazione al corso di  
informazione)

<b>Nome e cognome del lavoratore</b>	
<b>Telefono</b>	
<b>FAX</b>	
<b>E-MAIL</b>	
<b>Facoltà</b>	
<b>Dipartimento</b>	
<b>Laboratorio (Stanza-piano-Edificio)</b>	
<b>Responsabile Dipartimento</b>	
<b>Responsabile Laboratorio</b>	

Roma, lì .....