

Ministero dell'Interno
Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
RADIOATTIVITA'

Servizio Tecnico Centrale

ISPETTORATO PER LA FORMAZIONE PROFESSIONALE

CORSI MULTIMEDIALI

RADIOATTIVITÀ

Servizio Tecnico Centrale

Ispettorato per la Formazione Professionale

Gruppo di lavoro

Ing. Massimo Ricci – coordinatore

Ing. Emanuele Pianese

Geom. Raffaele Giuliani

Realizzazione

CISIT S.p.A.

Testi

Prof. Alessandro Albanese

Prof. Claudio Cigognetti

Prima edizione - luglio 2001

Documentazione reperibile in formato web sul sito dei Vigili del Fuoco Volontari di Lanzo Torinese:
<http://www.vvflanzo.it/N.B.C.R.13%20RADIOAT.htm> Mail indicate: info@vvflanzo.it vvflanzo23@libero.it

1. STRUTTURA E DIMENSIONI CARATTERISTICHE DELLA MATERIA	<u>Non disp.</u>
1.1 Atomi, molecole e nuclei	
1.2 Dimensioni caratteristiche della materia	
1.3 Le reazioni chimiche	
1.4 La tavola periodica degli elementi	
1.5 Gli isotopi	
2. LA RADIOATTIVITÀ	<u>Pag.5</u>
2.1 La radioattività naturale	
2.2 Decadimento alfa	
2.3 Decadimento beta	
2.4 Decadimento gamma	
2.5 Periodo di dimezzamento dei radioisotopi	
2.6 Le sorgenti della radioattività naturale	
2.7 La radioattività artificiale	
2.8 Famiglie radioattive	
3. LE REAZIONI NUCLEARI	<u>Pag.12</u>
3.1 Introduzione	
3.2 La fusione	
3.3 La fissione	
3.4 Impieghi militari dell'energia nucleare	
3.4.1 La bomba all'uranio di Hiroshima	
3.4.2 La bomba al plutonio Nagasaki	
3.4.3 La bomba all'idrogeno (bomba H)	
3.4.4 La bomba al neutrone	
3.4.5 Effetti di un'esplosione nucleare	
3.5 Impieghi civili dell'energia nucleare	
3.5.1 Introduzione	
3.5.2 Il reattore a fissione	
3.5.3 Lo smaltimento delle scorie nucleari	
3.5.4 L'incidente nel reattore di Chernobyl	
3.5.5 Prospettive per il futuro: il reattore nucleare a fusione	
4. LA RADIOATTIVITÀ AMBIENTALE	<u>Non disp.</u>
4.1 Introduzione	
4.2 Radioattività naturale	
4.2.1 Radon e toron	
4.2.2 Raggi cosmici	
4.3 Impieghi civili e militari di alcuni radionuclidi	<u>Pag.25</u>
4.3.1 Uranio impoverito	
4.3.2 Applicazioni in campo medico	
4.3.3 Radionuclidi e metodi datazione	
4.3.4 Altri impieghi dei radionuclidi	

5. INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI CON LA MATERIA

Pag.28

5.1 Le radiazioni ionizzanti

5.2 Effetti fisici dell'interazione della radiazione gamma con la materia

5.2.1 Effetto fotoelettrico

5.2.2 Effetto Compton

5.2.3 Produzione di coppie

5.3 Le grandezze fisiche e le unità caratterizzanti la radioattività

5.3.1 Attività e sua unità di misura

5.4 Attività specifica

5.4.1 Dose assorbita e sua unità di misura

5.4.2 Kerma (in aria) e sua unità di misura

5.4.3 Primi cenni alle grandezze di rilievo per l'interazione con gli organismi viventi

6. RIVELATORI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

Pag.35

6.1 Classificazione

6.2 Sonde di Geiger e Müller

6.3 Contatori (scaler)

6.4 Scintillatori

6.5 Spettroscopia gamma: analizzatori multicanale

6.6 Dosimetri personali

6.6.1 Dosimetri fotografici

6.6.2 Dosimetri a camera di ionizzazione

6.6.3 Dosimetri a termoluminescenza

7. EFFETTI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI SUGLI ESSERI VIVENTI

Pag.42

7.1 Effetti deterministici e probabilistici

7.2 Effetti sulle cellule

7.3 Danni al DNA e meccanismi di riparazione

7.4 Trasferimento lineare di energia

7.5 Fattore di qualità per la radiazione

7.6 Effetti sui tessuti (fattore di ponderazione)

7.7 Effetti sul corpo umano

7.7.1 Esposizione esterna o interna

7.7.2 Effetti somatici deterministici

7.7.3 Effetti somatici tardivi ed effetti ereditari

8. PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Non disp.

8.1 Principi di radioprotezione

8.2 Grandezze e unità di misura utilizzate in radioprotezione

8.2.1 Dose equivalente e Sievert

8.2.2 Dose efficace

8.2.3 Esposizione (di ionizzazione) come grandezza fisica

8.3 Raccomandazioni di organismi internazionali

8.4 La legislazione italiana ed europea ed i limiti di dose

8.5 Lavoratori esposti alle radiazioni ionizzanti

8.6 Standard di protezione

9. CONTROLLO DELLA RADIOATTIVITA' AMBIENTALE

Non disp.

9.1 Il controllo ambientale

9.2 Attività di vigilanza sull'impiego di radiazioni ionizzanti

9.3 Ambienti di lavoro: zona sorvegliata e zona controllata

9.4 Trasporti radioattivi

9.4.1 Generalità

9.4.2 Attività specifica e contaminazione

9.4.3 Categorie

9.4.4 Requisiti e controlli per il trasporto di sostanze con altre proprietà pericolose

9.4.5 Requisiti e controlli per la contaminazione dei colli

10.LA RADIOATTIVITÀ E IL CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO

Pag.48

10.1 I decreti 230 e 241 e il C. N. VV. F.

10.2 Rateo o intensità delle grandezze dosimetriche

10.3 Rete nazionale di allarme e rilevamento della ricaduta radioattiva del C.N.VV.F.

10.4 Servizio dosimetrico nazionale

10.5 Interventi in presenza di sostanze radioattive

10.6 Strumenti

10.6.1 Interventi di emergenza

10.6.2 Individuazione e eventuale recupero di una sorgente smarrita

10.6.3 Contaminazione

10.6.4 Incendio

10.7 Rischio nucleare

10.7.1 Introduzione (scala internazionale degli eventi nucleari)

10.7.2 Piani di emergenza degli impianti italiani e interventi del C.N.VV.F.

10.7.3 Emergenza radiologica

11.SORGENTI PUNTIFORMI ESPOSTE: METODI PER IL CALCOLO DELLA DOSE

Non disp.

11.1 Calcolo della dose

11.2 Un'alternativa ai calcoli con le potenze

11.3 Un altro esempio di applicazione dei vecchi calcoli: la delimitazione di una zona a causa di una sorgente esposta

APPENDICE NORMATIVA

Legge n. 469 del 13 maggio 1961, n.469

Decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230, così come modificato ed integrato da D.Lgs. 241/2000

Circolare n. 70 del 08-08-1973

Circolare n. 88 del 25-09-1973

Circolare n.15 MI.SA. (84) 6 del 03-05-1984

Lettera circ. 14138/24205 del 17/08/1990

Lettera circ. 3675/24218 del 04/08/1998

2. LA RADIOATTIVITÀ

2.1 LA RADIOATTIVITÀ NATURALE

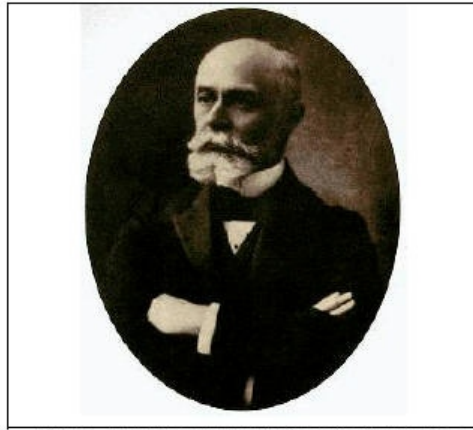


Fig.16 - Henri Becquerel (fonte: Health Physics Society)

Nel 1896, il fisico francese Henri Becquerel (Fig.16) lavorando con alcuni composti chimici contenenti sali di uranio, si accorse che le lastre fotografiche presenti nel suo laboratorio si impressionavano tutte le volte che venivano avvicinate a tali composti, pur essendo debitamente schermate dalla luce. Questo annerimento delle lastre gli suggerì l'esistenza di una qualche forma di radiazione, diversa dalla luce ed in grado di superare il rivestimento opaco delle lastre in analogia ai **raggi X** scoperti l'anno prima dal fisico tedesco Wilhelm Röntgen

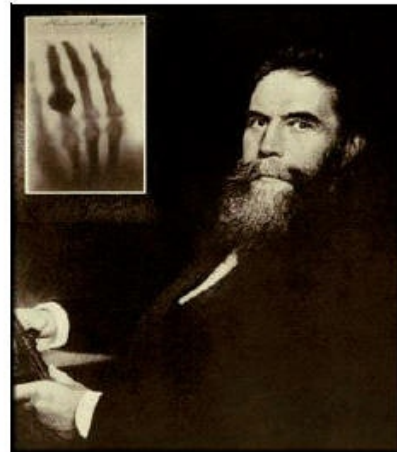


Fig.17 - Wilhelm Röntgen in una foto del 1895: nell'insero una radiografia della mano della moglie ottenuta con i raggi X (fonte: Health Physics Society)

Successivamente vennero scoperte altre sostanze caratterizzate dallo stesso tipo di comportamento. In particolare i coniugi Pierre e Marie Curie (Fig.18)

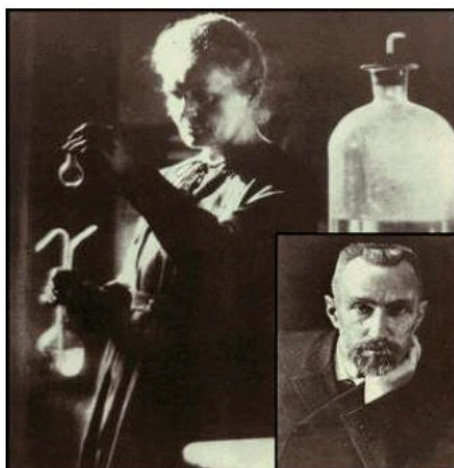


Fig.18 - Marie Curie fotografata nel suo laboratorio nel 1920: nell'insero il marito Pierre (fonte: Health Physics Society)

isolarono il polonio e il radio: il fenomeno venne definito perciò con il nome **radioattività** mentre si ipotizzò che le sostanze che generavano questo tipo di radiazione subissero nel contempo modificazioni sostanziali all'interno dei loro nuclei altrimenti dette

decadimenti radioattivi.

Nel 1899, Ernest Rutherford scoprì che tutti i composti dell'uranio producevano tre differenti tipi di radiazioni: riuscì a distinguerle in base alla loro diversa capacità di penetrazione e le chiamò con le prime tre lettere dell'alfabeto greco rispettivamente radiazione **alfa**, α , **beta**, β e **gamma**, γ . In questo semplice esperimento si possono separare i tre tipi di radiazione emessi da un campione radioattivo contenuto in un blocco di piombo forato nella parte superiore. Basandosi sulla capacità di un magnete di incurvare in direzioni opposte le radiazioni alfa e beta lasciando inalterata la traiettoria della radiazione gamma, si ottiene la suddivisione delle tre radiazioni.

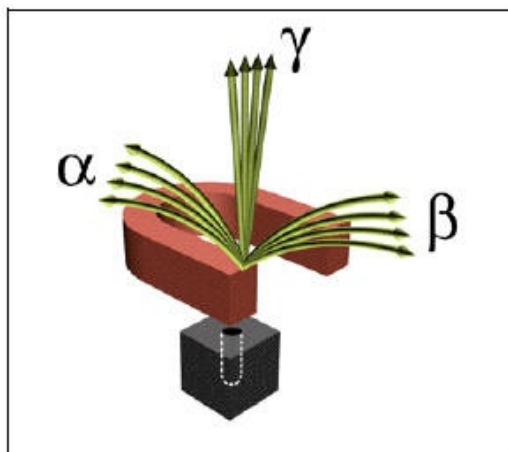


Fig.19 - L'interazione tra campo magnetico e i tre tipi di radiazione scoperti da Rutherford

La radiazione alfa può essere schermata mediante un semplice foglio di carta, essendo costituita, come dimostrò lo stesso Rutherford, da un nucleo di un atomo leggerissimo chiamato elio formato da due protoni e due neutroni ($Z=2$; $N=2$; $A=4$; simbolo: 4He). La radiazione beta invece venne in seguito spiegata come un insieme di elettroni animati da elevatissima velocità. Una lastra di alluminio spessa alcuni millimetri riesce a bloccare quasi completamente la radiazione beta. E' proprio la natura opposta delle cariche elettriche possedute dalle particelle alfa e beta a determinarne la deflessione delle traiettorie lungo direzioni opposte, nell'esperimento precedente. La radiazione gamma fu spiegata come un insieme di **fotoni** caratterizzati da un elevatissima energia: in questo caso la schermatura richiede una parete di cemento o, meglio ancora, di piombo.

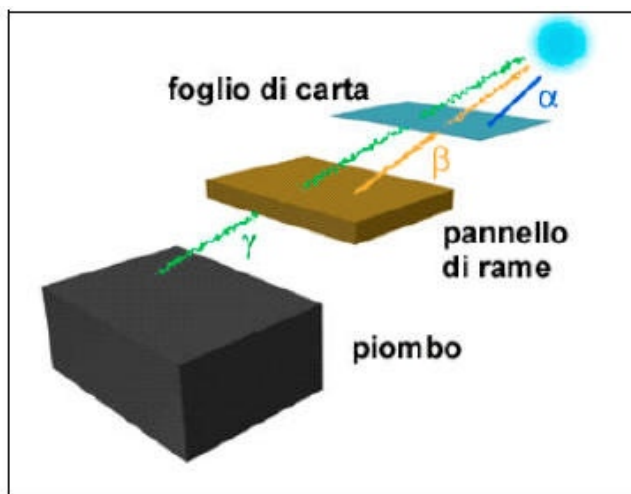


Fig.20 - Il differente potere di penetrazione delle tre radiazioni

2.2 DECADIMENTO ALFA

Consiste nella emissione di un nucleo di elio, anche detto particella alfa: essendo questa particella costituita da nucleoni, essa dovrà originarsi da un nucleo atomico e nello stesso tempo tale nucleo che l'avrà emessa si alleggerirà in seguito alla perdita di ben quattro nucleoni (ricordiamo 2 protoni +2 neutroni). Il cambiamento che si avrà in seguito alla diminuzione del numero di protoni, Z , determinerà nel nucleo sorgente un cambiamento sostanziale: si formerà un altro elemento chimico!

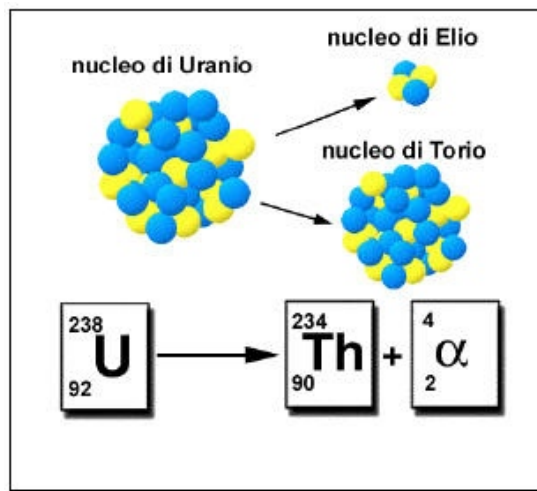


Fig.21 - Il decadimento alfa dell'uranio 238 che decade in torio 234 in seguito all'emissione di una particella alfa

Cerchiamo di capire il significato dei numeri che compaiono nella figura:

- 238 è il numero di massa, A, dell'uranio (cioè la somma tra il numero di protoni, Z, e neutroni, N, contenuti nel nucleo);
- 92 è il numero di protoni, Z, anche detto numero atomico.
- Il Torio è caratterizzato da A=234 e Z=90.

Perché?

La spiegazione sta nella particella alfa a destra: il nucleo di elio in questione fuoriuscito da quello originario di uranio è costituito da due protoni (Z=2) e due neutroni cosicché il suo numero di massa è A=4. Allora ecco spiegato il motivo della trasformazione di U in TH : infatti quest'ultimo ha un numero di massa e un numero atomico pari alla differenza tra quello dell'uranio e quello della particella alfa

(A=234=238-4; Z=90=92-2).

Possiamo concludere aggiungendo che l'instabilità di un isotopo che decade emettendo una particella alfa dipende dalla competizione all'interno dei nuclei atomici tra forze **nucleari attrattive** e forze **elettrostatiche repulsive**: negli elementi ad elevato numero atomico può accadere che le forze nucleari non riescano a contrastare completamente le forze repulsive esistenti tra i numerosissimi protoni e così dei "pezzetti di nucleo" fuoriescano verso l'esterno animati da una considerevole

energia cinetica.

Se si fa una misura accurata della massa del nucleo "genitore" e la si confronta con quella dei nuclei "figli" prodotti dopo il decadimento ci si accorgerà che un certo quantitativo di massa si è volatilizzata. La famosa equazione di Einstein $E=mc^2$ (E, energia; m, massa; c, velocità della luce) spiega che la massa che manca si è trasformata in energia cinetica posseduta dai prodotti del decadimento. In generale il decadimento alfa può preludere a un altro decadimento: il ciclo delle disintegrazioni si arresterà solo quando si arriverà a un prodotto finale stabile.

2.3 DECADIMENTO BETA

Le particelle beta non sono altro che elettroni emessi dal nucleo: dal momento che però la massa di un elettrone è una frazione irrisoria rispetto a quella del nucleo possiamo dire che tutte le volte che un nucleo subisce un decadimento beta il suo numero di massa A rimane costante.

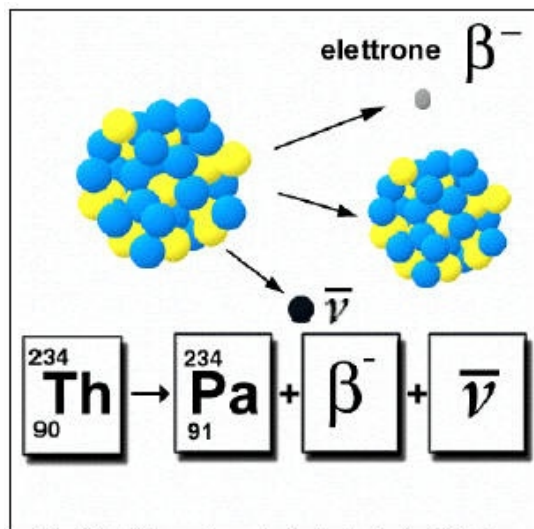
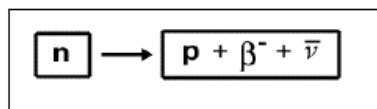


Fig.22 - Il decadimento beta del torio 234 che decade in protoattinio 234 in seguito all'emissione di una particella beta

Questo fenomeno sembra in contraddizione con quanto detto prima e cioè che nel nucleo ci sono solamente protoni e neutroni caratterizzati da cariche elettriche positive gli uni e dall'assenza di cariche elettriche gli altri. Da dove vengono fuori questi "elettroni nucleari"? La spiegazione è solo un po' più complicata rispetto al caso precedente: in un decadimento beta (per motivi che vedremo poi, detto anche beta meno) si ha la trasformazione di un neutrone in un protone, in un elettrone e^- o β^- e in un'altra particella neutra di massa piccolissima chiamata **antineutrino** - tradizionalmente indicata con la lettera greca $\bar{\nu}$ (si pronuncia ni) - che è assai difficile da rivelare.



Il protone sostanzialmente prende il posto del neutrone all'interno del nucleo che subisce il decadimento beta, ma così facendo fa aumentare il numero atomico Z del nucleo di una unità (conseguentemente N diminuisce di un'unità in modo tale che A non vari). nuovo a partire da un altro elemento chimico, come abbiamo già visto nel caso del decadimento alfa. Oltre ad A c'è un'altra grandezza fisica che non varia in questo decadimento: è la carica elettrica. Se infatti il neutrone che decade è caratterizzato dall'assenza di carica elettrica, anche il protone e l'elettrone prodotti nel decadimento hanno una carica elettrica complessiva nulla (hanno cariche elettriche uguali ma di segno opposto), mentre il neutrino non ha alcuna carica. Facciamo ora un esempio di decadimento beta diverso (Fig.23).

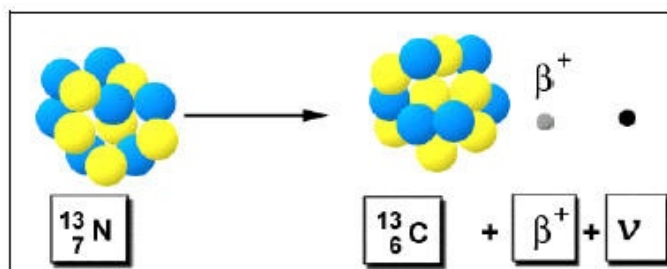


Fig.23 - Il decadimento β^{+} dell'isotopo dell'azoto

L'isotopo dell'azoto (simbolo N) caratterizzato da $A=13$ e $Z=7$ si trasforma in un isotopo del carbonio (simbolo C) caratterizzato da un $Z=6$ ma dallo stesso numero di massa A . Contemporaneamente due nuove particelle si allontanano dal nucleo: l'elettrone positivo e^+ o β^+ e il neutrino ν (simile all'antineutrino dal quale differisce soltanto per proprietà magnetiche) che trasportano via anche un certo quantitativo di energia cinetica. Ricordiamo che sia il neutrino che l'antineutrino sono particelle assai "sfuggenti" e che risultano invisibili anche ai più sofisticati rivelatori adoperati nei vari laboratori del mondo. Questo per due motivi: il primo perché hanno massa piccolissima e il secondo perché, essendo neutre, interagiscono poco con la materia. Esiste allora un altro tipo di decadimento beta (chiamato **beta più**), più raro, che è stato scoperto negli elementi radioattivi non naturali: in esso si verifica la trasformazione inversa a quella vista precedentemente: ossia un protone si trasforma in un neutrone con l'emissione di un **positrone** - una particella avente la stessa massa e carica dell'elettrone ma segno opposto - più un neutrino. Possiamo aggiungere che non tutti i neutroni presenti nei vari nuclei atomici si trasformano naturalmente in protoni. In generale il neutrone decade in un protone solamente in due situazioni particolari: o quando è libero, quando cioè non sta all'interno del nucleo, oppure quando sta in un nucleo che ha un eccesso di neutroni.

2.4 DECADIMENTO GAMMA

I raggi gamma non hanno massa a differenza dei raggi alfa e beta. Sono **fotoni** altamente energetici, della stessa famiglia dei **raggi X** e dei fotoni che costituiscono la **luce visibile**: entrambe sono manifestazioni del **campo elettromagnetico**. La loro differenza sta nelle rispettive **lunghezze d'onda**: più corte nei raggi gamma, più elevate nella luce visibile e, andando dall'altra parte dello **spettro elettromagnetico**, più elevate ancora nei raggi infrarossi e nelle radioonde.

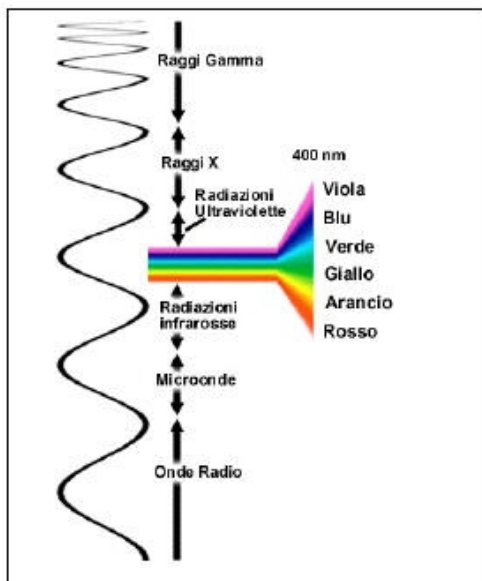


Fig.24 - Lo spettro elettromagnetico. A sinistra una rappresentazione dell'oscillazione del campo elettromagnetico. La distanza tra due picchi è la lunghezza d'onda

Il decadimento gamma si ha tutte le volte che nel nucleo si hanno dei riarrangiamenti nella disposizione dei neutroni e dei protoni verso configurazioni più stabili. In genere ciò si ha subito dopo un decadimento alfa o beta (Fig.25).

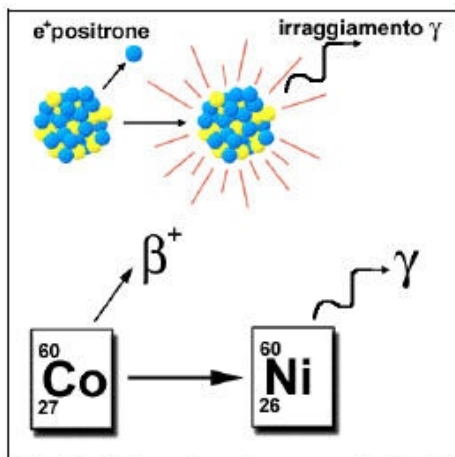


Fig.25 - Il decadimento gamma del nickel 60 con emissione di un fotone a seguito del decadimento beta del cobalto 60

La reazione che descrive il decadimento gamma è un po' strana perché in essa non variano né Z, né N e, conseguentemente, neppure A. In realtà, come abbiamo detto, il nucleo passa ad uno stato energetico più basso.

2.5 PERIODO DI DIMEZZAMENTO DEI RADIOISOTOPI

Si definisce **attività** di una sostanza radioattiva il numero di disintegrazioni che avvengono nella sostanza nell'unità di tempo. Se si prende una certa quantità di un materiale radioattivo si vede che la sua attività

A diminuisce al passare del tempo, come conseguenza del decadimento spontaneo subito dai nuclei. La legge con cui l'attività varia, al passare del tempo, è la stessa per tutte le sostanze radioattive ed è rappresentata dalla curva di decadimento (Fig. 26).

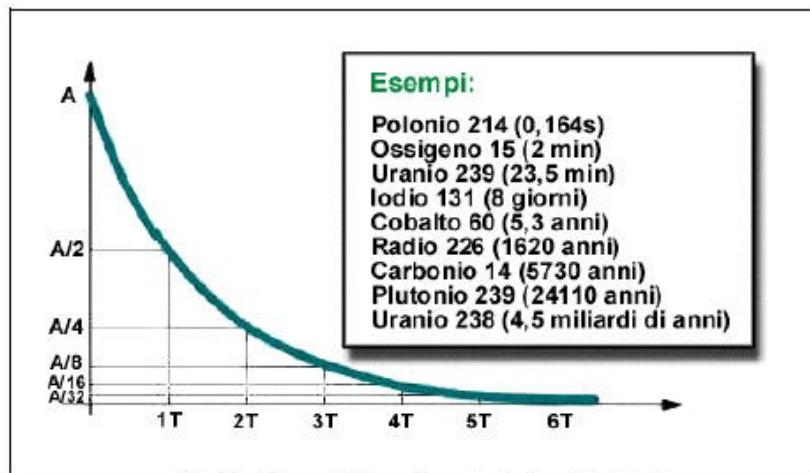


Fig. 26 - Curva di decadimento dei radioisotopi

La curva ha la proprietà caratteristica di ridursi della metà in un intervallo T detto **periodo di dimezzamento**. Ciò significa che se, all'istante iniziale avevamo un valore di attività A, dopo un periodo di dimezzamento esso si sarà ridotto della metà e così via. Posto il concetto di tempo di dimezzamento, ne consegue che l'attività di una sorgente è teoricamente inestinguibile. In pratica quando essa sarà scesa a valori trascurabili, a valori cioè per cui è impossibile distinguere dall'attività sempre presente in natura, si dirà che la sorgente è esaurita. L'andamento delle diminuzioni di attività di una sorgente è di tipo esponenziale:

$$A = \frac{A_0}{2^n}$$

Dove **A₀** è l'attività iniziale, **A** è l'attività al tempo t e **n** è il numero di tempi di dimezzamento dall'inizio al tempo t. Nel riquadro della figura 26 sono indicati alcuni isotopi e i loro periodi di dimezzamento caratteristici: vediamo che essi variano da frazioni di secondo a miliardi di anni.

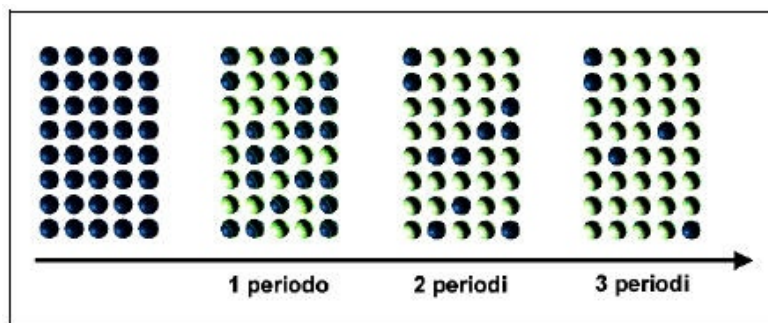


Fig. 27 - Esempio numerico relativo a un campione di 40 radioisotopi (pallini scuri) dopo tre successivi periodi di dimezzamento: i prodotti del decadimento sono rappresentati da pallini più chiari

In figura 27 il concetto di tempo di dimezzamento è visualizzato prendendo inizialmente un campione di 40 radionuclidi (a sinistra): si può capire come dopo pochi periodi di dimezzamento l'attività si sia ridotta drasticamente (anche se il periodo di dimezzamento può implicare miliardi di anni come nel caso dell'uranio!)

2.6 LE SORGENTI DELLA RADIOATTIVITÀ NATURALE

Perché tutti i radioisotopi naturali presenti sulla Terra non si sono disintegrati del tutto fino a diventare dei nuclei stabili?

Ci sono diverse risposte:

- esistono radioisotopi caratterizzati da periodi di dimezzamento lunghissimi come l'uranio 238 (4,5 miliardi di anni) o il potassio 40 (1,3 miliardi di anni) che hanno vissuto appena qualche periodo di dimezzamento dalla creazione della Terra;
- esistono radioisotopi che risultano essere prodotti di decadimento dei precedenti (ad es. il radio 226 prodotto dalla disintegrazione dell'uranio) sono per questo motivo continuamente rigenerati;
- esistono radioisotopi, come il carbonio 14, che sono prodotti incessantemente dai **raggi cosmici** che bombardano la nostra atmosfera. Possiamo dire perciò che tutte le forme di vita che abitano la Terra si trovano esposte a un bagno di radioattività naturale anche se l'uomo ne è consapevole solo da cento anni.

2.7 LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

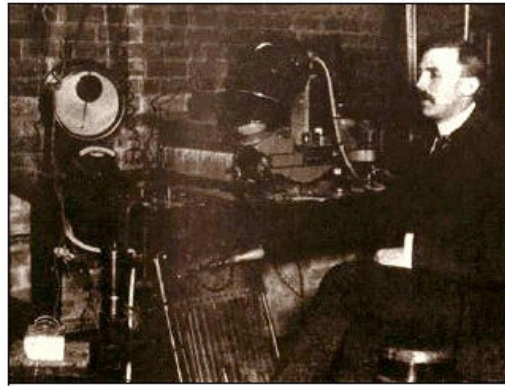


Fig.28 - Ernest Rutherford nel suo laboratorio presso la McGill University, nel 1903 (fonte: Health Physics Society)

Nel 1919 E. Rutherford (Fig.28) riuscì a provocare artificialmente la trasformazione di un elemento chimico in un altro o, come si dice la **trasmutazione** di un nucleo stabile in un altro nucleo. Egli scoprì che si può raggiungere questo scopo bombardando gli atomi con particelle alfa dotate di energia così elevata da penetrarne i nuclei vincendone la repulsione elettrostatica, arrivando così a spezzarli. Qualora il nucleo prodotto in una trasmutazione non sia stabile ma si comporti come un nucleo radioattivo, allora si parla di radioattività artificiale. Nel 1934 I. Curie e F. Joliot bombardando un foglio di alluminio 27 con delle particelle alfa ottennero la formazione di un nuovo radioisotopo, il fosforo 30, non presente in natura. Attualmente nei laboratori di ricerca e nei reattori nucleari vengono prodotti radioisotopi artificiali per le più diverse applicazioni nell'industria e in medicina. Sono stati prodotti artificialmente elementi chimici transuranici e sono anche stati prodotti radioisotopi di quasi tutti gli elementi della tavola periodica: questi isotopi sono utilizzati principalmente come sorgenti di radiazione e come traccianti radioattivi. Radioisotopi artificiali sono contenuti anche nelle cosiddette scorie radioattive, prodotti di scarto delle centrali nucleari, il cui trasporto e stoccaggio costituisce un delicatissimo problema per le possibili conseguenze sull'ambiente. Contengono radioisotopi artificiali anche le ricadute radioattive causate dagli esperimenti nucleari militari o emissioni causate da incidenti nelle centrali nucleari.

2.8 FAMIGLIE RADIOATTIVE

In natura esistono tre **famiglie radioattive** nelle quali si verifica la generazione di elementi radioattivi in seguito ai decadimenti alfa e beta di altri elementi radioattivi e questo per un certo numero di generazioni fino a giungere finalmente a un nucleo stabile. Queste famiglie radioattive sono indicate con il nome dei loro capostipiti: la famiglia dell'uranio (**U**) del torio (**Th**) e la famiglia dell'attinio (**Ac**). La famiglia dell'uranio è rappresentata nella figura 29.

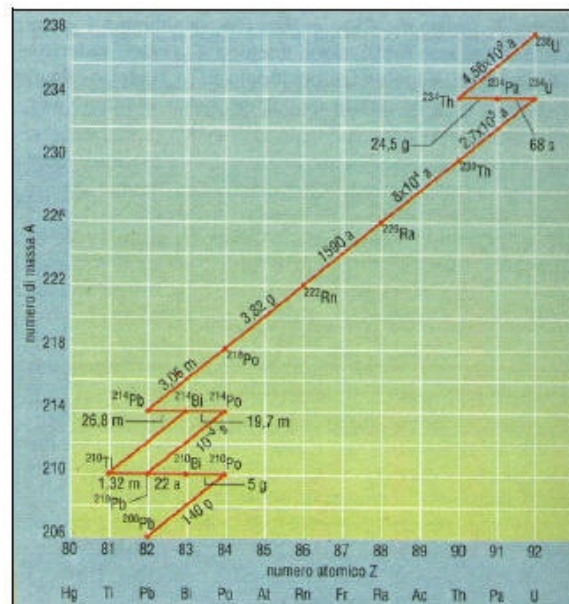


Fig.29 - La famiglia radioattiva dell'uranio

Nella figura ogni nucleo è indicato riportando in ascisse il suo numero atomico Z e in ordinata il suo numero di massa A. I decadimenti alfa sono rappresentati da segmenti che vanno diagonalmente da destra verso sinistra scendendo di quattro unità in verticale e spostandosi di due unità a sinistra, i decadimenti beta da segmenti orizzontali che vanno da sinistra verso destra lunghi una unità. Accanto a ognuno dei segmenti è indicato il corrispondente periodo di dimezzamento: a, anno; d, giorno; m, minuto; s, secondo. La parte di uranio 238 che si è

disintegrata sin dalla nascita della Terra si è dunque trasformata attraverso una serie di decadimenti alfa e beta in piombo 206 che, essendo l'ultimo membro della famiglia, è stabile.

APPROFONDIMENTO

Le famiglie radioattive hanno origine da un elemento a vita media lunghissima e terminano con un elemento stabile. Oltre alla famiglia dell'uranio ricordiamo:

- **la famiglia del torio**, che inizia con il torio 232 (avente un periodo di dimezzamento lunghissimo quasi 14 miliardi di anni), comprende 13 nuclidi e termina con il piombo 208;
- **la famiglia dell'attinio**, che inizia con l'uranio 235, il quale ha un periodo di dimezzamento di 710 milioni di anni, comprende 17 elementi e termina con il piombo 207. Secondo alcuni studiosi i capostipiti delle tre famiglie non sarebbero in realtà quelli menzionati, bensì altri elementi di elevata radioattività (piccolo periodo di dimezzamento), i quali attualmente non si troverebbero più sulla Terra. È interessante osservare che, attraverso la valutazione della quantità di isotopi di piombo contenute nei minerali di uranio e di torio, è possibile stabilire l'età di tali minerali e, di conseguenza, l'età della Terra stessa.

3. LE REAZIONI NUCLEARI

3.1 INTRODUZIONE

Se dei nuclei atomici si avvicinano considerevolmente tra loro allora essi possono interagire attraverso la forza nucleare forte, che, come si è detto, agisce solo su piccole distanze dell'ordine delle dimensioni del nucleo. Così come le forze di legame esistenti tra gli atomi, nelle molecole, sono la fonte dell'energia chimica, allo stesso modo si può affermare che le forze di legame tra i nucleoni sono all'origine dell'energia nucleare. L'energia di legame dei nucleoni (ossia l'energia che occorre spendere per separare un nucleone dal suo nucleo) non è la stessa per i vari elementi: è debole per i nuclei leggeri e massima per i nuclei medi (come il ferro) e torna a diminuire per i nuclei pesanti.

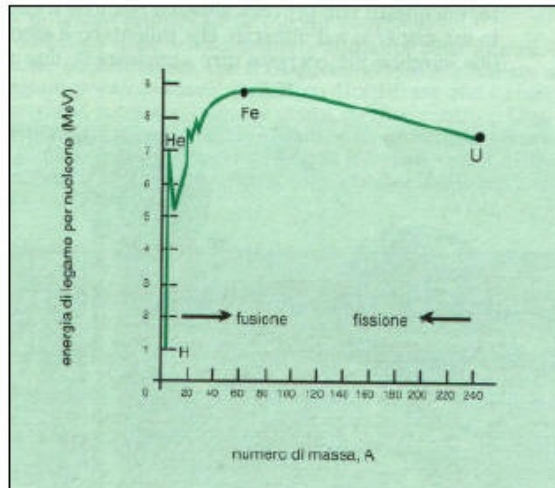


Fig.30 - Nel grafico viene riportata l'energia di legame media per ogni nucleone in funzione del numero di massa: inizialmente l'energia aumenta rapidamente, poi ha un massimo per numeri di massa vicini a quelli del ferro e quindi decresce negli elementi più pesanti. L'energia che si ottiene nella fusione o nella fissione è data dalla differenza delle energie di legame dei reagenti rispetto a quelle dei prodotti della reazione nucleare: nella fusione si avrà un passaggio da nuclei leggeri (posti a sinistra nel grafico) verso nuclei medi (posti al centro nel grafico); nella fissione, da nuclei pesanti (posti a destra nel grafico) verso nuclei medi (posti al centro nel grafico)

Una reazione nucleare interviene trasformando i nuclei: così come avviene nelle reazioni chimiche, dunque, si avranno reazioni nucleari esotermiche (che rilasciano energia verso l'esterno) ed endotermiche (richiedono un input energetico). Per quello che si è appena detto saranno esoenergetiche tutte quelle reazioni nucleari che, a partire da nuclei leggeri, genereranno nuclei medi (reazioni di **fusione**) e, simmetricamente, tutte quelle che a partire da nuclei pesanti genereranno nuclei medi (reazioni di **fissione**). Nel seguito vengono presi in considerazione questi due tipi di reazioni nucleari per le loro rilevanti applicazioni tecnologiche.

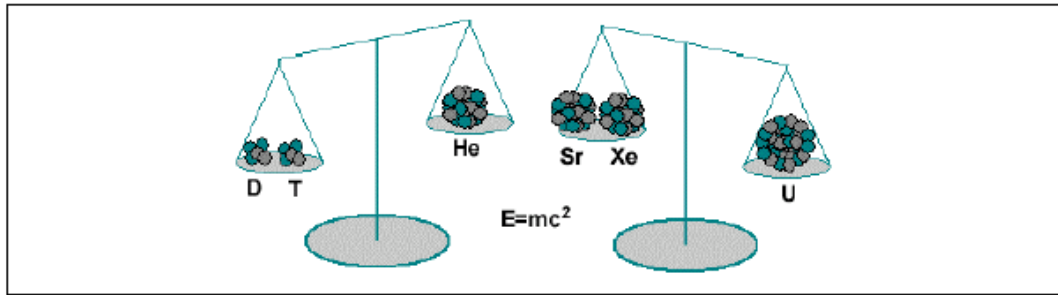


Fig.31 - A sinistra, la somma delle masse di due nuclei leggeri (deuterio e trizio) è maggiore di quella del nucleo di elio che si forma nella loro fusione (la reazione di fusione perciò converte la massa mancante in energia). A destra, per atomi medi (più pesanti del ferro) il discorso si inverte completamente: questa volta è la massa dei due nuclei medi (per es. stronzio e xenon) a essere minore del nucleo pesante (per esempio uranio) che con la sua fissione li ha generati (è la reazione di fissione a convertire la massa mancante in energia)

3.2 LA FUSIONE

La fusione è una reazione nucleare nella quale due nuclei leggeri si fondono per formarne uno più pesante. L'energia prodotta dal Sole ha origine proprio nei processi di fusione che avvengono incessantemente al suo interno, così come è una reazione di fusione quella che si verifica negli ordigni termonucleari (bombe all'idrogeno). Un esempio tipico di questa reazione è quello che coinvolge due isotopi molto importanti dell'idrogeno, H, tanto rilevanti da meritarsi un nome specifico: deuterio e trizio. Il primo ha un nucleo composto da un protone e da un neutrone (simbolo ${}^2_1\text{H}$), il secondo ha un neutrone in più (simbolo ${}^3_1\text{H}$). La reazione di fusione tra deuterio e trizio produce un nucleo di elio (simbolo ${}^4_2\text{He}$) accompagnato da un neutrone (vedi figura 32).

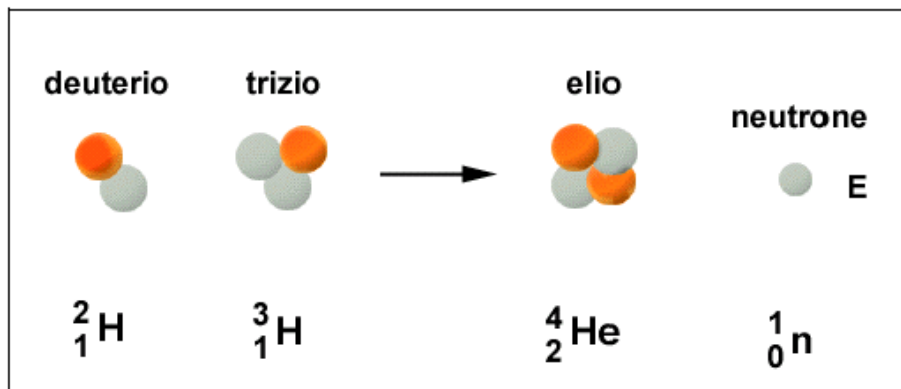


Fig.32 - La reazione di fusione tra gli isotopi dell'idrogeno

L'energia liberata in questo tipo di reazione è pari a un milione di volte quella liberata in una tipica reazione chimica. Come già abbiamo visto in precedenza la massa dei prodotti di reazione è inferiore a quella dei reagenti in quanto la massa che manca all'appello è stata integralmente convertita in energia in accordo alla legge $E=mc^2$ che stabilisce l'equivalenza tra massa ed energia. Perché si inneschi la **reazione di fusione**, ossia perché la forza nucleare forte legghi fra loro in una nuova disposizione tutti i vari nucleoni dei reagenti, la repulsione elettrostatica esistente tra i nuclei del trizio e del deuterio deve essere vinta per mezzo di opportuni condizionamenti fisici. Nel Sole è l'enorme forza gravitazionale a schiacciare fra loro gli isotopi dell'idrogeno; invece nelle bombe termonucleari all'idrogeno, gli isotopi sono fatti collidere tra loro dall'esplosione di una bomba atomica a fissione (di cui si parlerà più avanti).

APPROFONDIMENTO

Reazioni di fusione avvengono da miliardi di anni nel nostro Sole e in tutte le stelle: tali reazioni producono via via elementi sempre più pesanti fino ad arrivare al ferro, che è l'elemento più stabile. Un volta che una stella, attraverso miliardi di anni di reazioni di fusione, è arrivata a sintetizzare al suo interno il ferro, a quel punto è da considerarsi vicina alla sua morte. Alcune stelle continuano debolmente a emettere quantitativi molto bassi di energia fino a spegnersi definitivamente; altre, le più grandi, subiscono un iniziale collasso indotto dalle forze gravitazionali, cui fa seguito un'enorme esplosione durante la quale viene emessa molta più energia di quanto la stella non ne abbia emessa nel corso della sua intera esistenza: la stella è diventata una supernova.

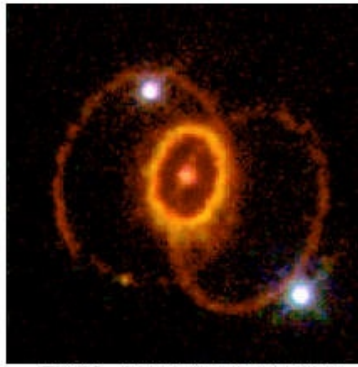


Fig.33 - Immagine ripresa dal telescopio spaziale Hubble che evidenzia la caratteristica struttura ad anelli della supernova 1987A (fonte: NASA/HST)

All'interno di una supernova le particelle sono animate da spaventose energie cinetiche, di gran lunga superiori a quelle che possedevano all'interno di una stella: si verificano così nuove reazioni di fusione che erano energeticamente inaccessibili prima. Il ferro stesso può essere sottoposto a reazione di fusione formando elementi chimici più pesanti. L'oro, l'argento e il piombo presenti sulla Terra sono stati "cucinati" nella fornace di una supernova miliardi di anni fa.

3.3 LA FISSIONE

La fissione nucleare (dal latino fissio = scissione) è un processo nel quale un nucleo pesante si spezza in due nuclei più leggeri: un classico esempio è quello relativo alla reazione che è stata alla base del funzionamento delle prime bombe atomiche e che è ancora utilizzata nei reattori delle centrali nucleari.

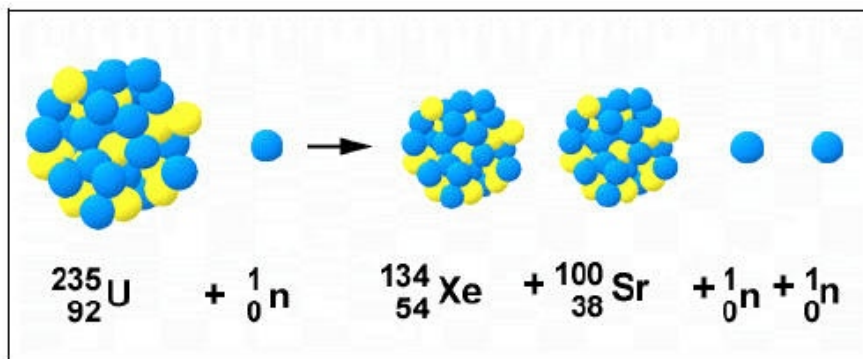


Fig.34 - Una tipica reazione di fissione che coinvolge l'uranio 235

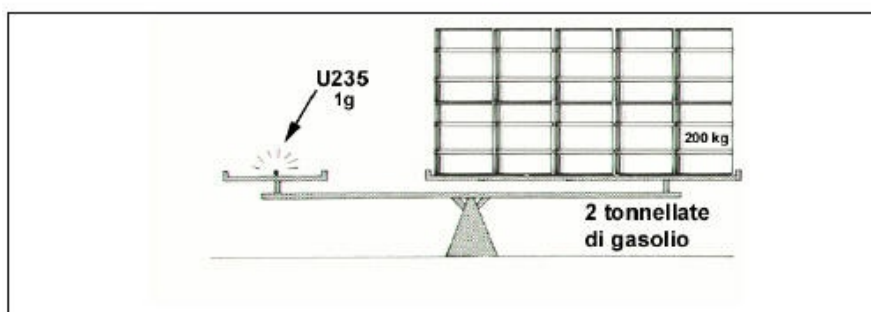


Fig.35 - Ai fini della produzione di energia per mezzo della fissione, 1 g di uranio 235 equivale a due tonnellate di gasolio

In seguito all'urto tra un neutrone e un atomo dell'isotopo 235 dell'uranio, quest'ultimo si spezza in due isotopi leggeri di vario tipo (nell'esempio raffigurato in figura 34 sono di stronzio e xenon) liberando anche due altri neutroni (ma in altri tipi di reazione possono essere tre): questi andranno a replicare la fissione in altri atomi di uranio 235 innescando quella che si definisce una reazione a catena. Una reazione a catena è un processo in cui i neutroni prodotti in una reazione vanno a loro volta a provocarne altre, in una crescita che può essere controllata (come nel caso delle centrali nucleari) o incontrollata (come avviene nelle bombe atomiche). In realtà questo tipo di reazione può dar luogo anche ad altri prodotti di fissione diversi da quelli rappresentati in figura: la condizione che deve essere rispettata comunque è che siano presenti nei prodotti di fissione lo stesso numero di protoni e neutroni presenti nel nucleo di uranio. Anche in questo caso, come in quello della fusione, parte della massa dei nuclei che subiscono la fissione viene trasformata in energia secondo la solita relazione $E=mc^2$. Tale energia viene assorbita

dai nuclei e dai neutroni prodotti come energia cinetica. La fissione si verifica a causa della repulsione elettrostatica che si manifesta tra i protoni presenti in così gran numero nei nuclei più pesanti (si ricordi che particelle cariche dello stesso segno, quali i protoni, si respingono): essa prevale sulla forza nucleare forte che tende invece a mantenere uniti i nucleoni. I due nuclei "figli" che si formano ovviamente subiscono anch'essi la repulsione elettrostatica interna, ma le loro dimensioni contenute permettono alla forza nucleare forte di prevalere. Si ricorda che questa forza è una forza a corto raggio che tende a indebolirsi se il nucleo è troppo "grosso". Non dovrebbe essere difficile immaginare perché la fissione sfrutti i neutroni come "proiettili" per spaccare i nuclei pesanti: è la neutralità elettrica che consente loro di penetrare nei nuclei non essendo respinti dalla carica positiva di questi ultimi. I prodotti della fissione sono dei nuclei ovviamente più leggeri dotati però di una grande velocità (8000 km/s); l'energia di movimento (cinetica) ad essi associata viene perduta nei numerosi urti con gli altri atomi presenti ed il risultato finale è il riscaldamento di tutto il materiale fissile presente.

3.4 IMPIEGHI MILITARI DELL'ENERGIA NUCLEARE

3.4.1 La bomba all'uranio di Hiroshima

La bomba che distrusse Hiroshima alle 9:15 del 6 agosto 1945 provocando 78.000 morti, 37.000 feriti e 13.000 dispersi, sfruttò la reazione di fissione del radioisotopo ²³⁵U dell'uranio; essa venne anche chiamata bomba A, o atomica, per distinguerla da quella termonucleare ottenuta qualche anno più tardi per fusione calda di nuclei leggeri.



Fig.36 a, b, c - Prime pagine di alcuni quotidiani che riportavano la notizia dello scoppio della prima bomba atomica

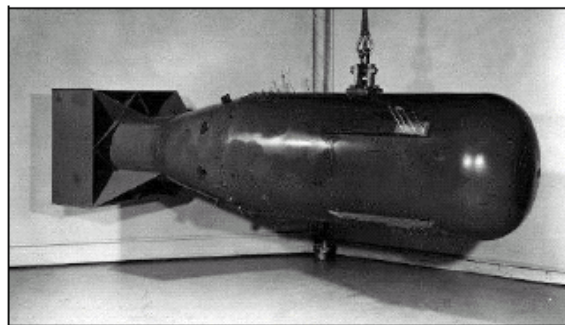


Fig.37 - Modello della bomba atomica "Little Boy" lanciata su Hiroshima il 6 agosto 1945: lunga circa tre metri pesava 5 tonnellate (fonte: Atomic Archive)

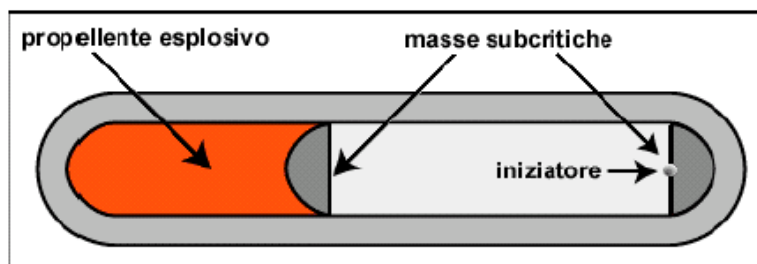


Fig.38 - Schema della sezione di "Little boy"

All'interno di questa bomba, chiamata "**Little boy**", una massa di uranio ²³⁵U veniva sparata mediante un apposito cannone contro un'altra massa contenente lo stesso radioisotopo. Tale urto determinava il formarsi di una massa cosiddetta supercritica (di conseguenza le due masse prima dell'urto venivano dette "subcritiche"), una sfera di

circa 10 cm di diametro, contenente cioè un numero sufficiente di atomi ed in geometria tale da essere in grado di generare una reazione nucleare a catena. L'innesco della reazione veniva determinato dal rilascio di un fiotto di neutroni da parte di un detonatore posizionato, nell'urto, al centro della massa supercritica. Una volta partita la reazione a catena, dopo circa un milionesimo di secondo, essa sprigionava una quantità tale di energia da provocare l'esplosione violentissima dell'ordigno. La potenza distruttiva stimata nel caso di Hiroshima fu di 12.5 kilotoni (kT), vale a dire una potenza distruttiva equivalente a quella prodotta da 20000 tonnellate di tritolo. L'esplosione della bomba ebbe luogo a circa 600 m di altezza. Dopo un decimillesimo di secondo si formò un globo di fuoco a 250 milioni di gradi Celsius, avente un diametro di circa 15 m che generò una emissione luminosa valutata, a 9 km di distanza, pari a 100 volte quella del Sole. Il globo si allargò poi fino a un diametro di circa 100 metri e poi si dissolse entro un secondo: dal globo ebbe inizio un "pino" che, estendendosi verso l'alto fino a 12-15 km, si dissolse entro qualche ora. In questo tipo di scoppio la violenza dell'onda d'urto è tale da distruggere completamente tutti gli edifici e da provocare una mortalità dell'85-95% entro un raggio di 800-900 m dell'epicentro; fino a 1500 m i danni rimangono gravissimi, sono fortemente danneggiate pareti di muratura di 50 cm di spessore mentre resistono gli edifici antisismici in cemento armato. Sensibili i danni diretti o indiretti fino a 3 km (incendi, corto circuiti, fughe di gas, allagamenti). Circa un terzo dell'energia che si sviluppa viene emessa sotto forma di radiazioni elettromagnetiche: ultraviolette, visibili e infrarosse. A queste ultime si deve l'origine dell'onda di calore che si prolunga per 3-5 secondi dopo l'esplosione fino a distanze di 3 - 4 km, e alla quale è imputata un 20% della mortalità a Hiroshima. Nei successivi paragrafi riepilogheremo questi effetti distruttivi in apposite tabelle. Gli effetti radioattivi sono dovuti alla emissione di radiazioni alfa, beta, gamma, X, di neutroni e di vari tipi di radioisotopi: si calcola che la radioattività prodotta dalla bomba a fissione equivalga a quella prodotta da un milione di tonnellate dell'elemento radio. Le conseguenze più gravi per l'uomo sono dovute ai neutroni e alla radiazione gamma, mentre i raggi alfa e beta sono rapidamente assorbiti dall'atmosfera. I neutroni si rivelarono letali a Hiroshima entro 600 m dall'epicentro mentre i raggi gamma entro 1200 m. Danni biologici irreversibili vennero accusati dai superstiti nell'arco di decine di anni dal tragico evento.

3.4.2 La bomba al plutonio Nagasaki

Alle 11:02 del 9 Agosto 1945 un secondo ordigno nucleare venne lanciato dall'aviazione statunitense stavolta sulla città di Nagasaki, provocando 73.000 morti e 74.000 feriti: al posto dell'uranio 235, l'ordigno sfruttò la fissione di un altro radioisotopo pesante, il plutonio 239.

Fig.39 - Modello della bomba atomica "Fatman" lanciata su Nagasaki il 9 agosto 1945. Nello spaccato a sinistra il nucleo centrale in cui era posizionato il combustibile nucleare (fonte: Atomic Bomb Museum of Nagasaki)

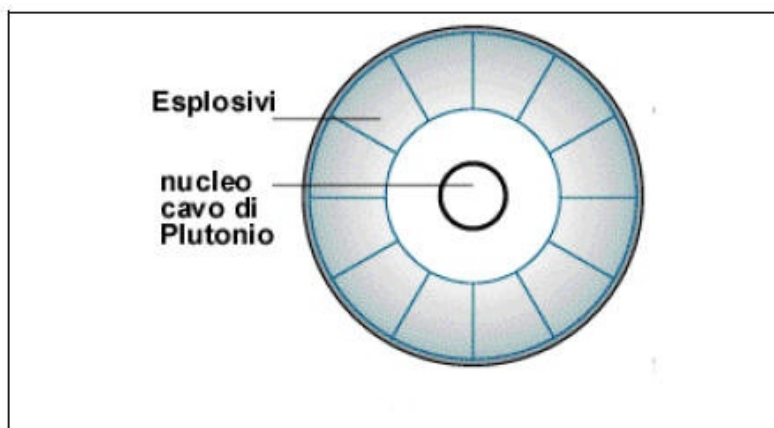


Fig.40 - Vista schematica della sezione della bomba al plutonio

"**Fatman**" ("**grassone**") fu l'appellativo dato a questa arma micidiale a causa della sua forma panciuta. Il plutonio 239, aveva dei tempi di dimezzamento così rapidi che l'innesco a sparo sfruttato per "Little boy" risultò improponibile. L'idea fu perciò quella di provocare una rapidissima implosione di una sfera cava di plutonio su sé stessa per mezzo di cariche esplosive convenzionali poste al suo esterno. In seguito all'aumento di densità del plutonio provocata dalla riduzione repentina del suo volume, si determinavano condizioni favorevoli alla reazione di fissione a catena innescata, anche stavolta, da un fiotto di neutroni tempestivamente immessi nella sfera. L'energia

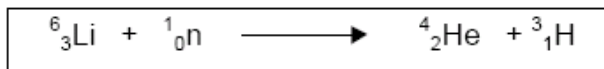
prodotta nella fissione venne stimata in 22 kilotoni, un valore superiore rispetto a quello dell'ordigno sganciato su Hiroshima, ma gli effetti distruttivi furono in parte limitati dalla presenza di rilievi montuosi attorno alla città.



Fig.41 - Fotografia aerea di Nagasaki, prima e dopo l'esplosione (Atomic Bomb Museum of Nagasaki)

3.4.3 La bomba all'idrogeno (bomba H)

Già prima che la bomba a fissione fosse messa a punto, gli scienziati compresero che era possibile pervenire, attraverso la fusione di alcuni nuclei leggeri, isotopi dell'idrogeno, agli stessi effetti distruttivi della bomba a fissione. L'innesco della fusione aveva bisogno però di temperature altissime e dunque il funzionamento di una bomba a fusione richiese accorgimenti tecnologici assai più sofisticati rispetto a quelli adottati nella bomba atomica. Nei primi test effettuati dagli Stati Uniti a partire dal 1952, venne sperimentata una bomba all'idrogeno a tre stadi. Il primo stadio era costituito da una piccola bomba a fissione, il cui scoppio produceva un flusso di radiazione altamente energetica. Questa radiazione investiva il secondo stadio della bomba, in cui era presente un composto contenente **deuterio** e **litio**, ingredienti fondamentali per la fusione, ma anche del materiale fissile. I neutroni interagendo con il litio ne provocavano la reazione nucleare:



Il **trizio** (${}^3_1\text{H}$) prodotto si combinava all'istante con il deuterio già presente innescando la reazione di fusione. Il terzo stadio era costituito invece da un involucro esterno di uranio 238: quest'ultimo, investito dal flusso di neutroni prodotto dalla fusione, subiva la fissione che serviva da un lato ad aggiungere potenza all'esplosione, dall'altra aumentava considerevolmente il livello di radioattività associato all'esplosione stessa. La potenza della bomba veniva così a dipendere al 50% dalla fusione dei nuclei leggeri e al 50% dalla fissione dei nuclei pesanti. La potenza prodotta da questo tipo di ordigni, era di circa 15 MT (megatoni, cioè milioni di tonnellate di tritolo). Attualmente sono prodotte bombe all'idrogeno aventi una potenza distruttrice dell'ordine di 100 MT.

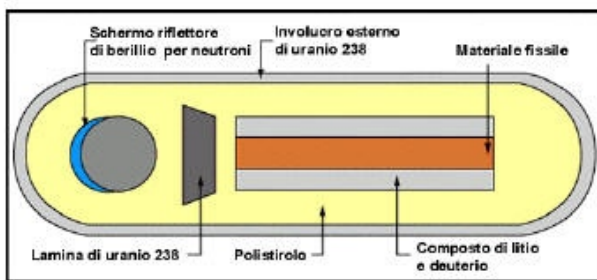


Fig.42 - Vista schematica della sezione della bomba all'idrogeno a tre stadi



Fig.43 - Il fungo nucleare prodotto dalla prima bomba all'idrogeno statunitense (1952)

3.4.4 La bomba al neutrone

E' uno degli ultimi ritrovati dell'industria bellica delle superpotenze nucleari. Si presenta come piccola bomba H modificata: l'implosione del terzo stadio verso il secondo viene infatti contenuta, diminuendo così la potenza distruttrice della bomba. Gli effetti letali principali sono causati perciò dalle radiazioni (in particolare dai neutroni) e non dall'onda d'urto e dal calore. L'**arma**, definita "**tattica**", agisce perciò nei confronti di tutte le forme di vita e risparmia le strutture (case, installazioni industriali e militari).

3.4.5 Effetti di un'esplosione nucleare

I danni arrecati da esplosioni nucleari alle cose e alle persone possono variare moltissimo in funzione della potenza distruttiva dell'ordigno, tipo di combustibile nucleare adoperato, altezza alla quale è avvenuto lo scoppio, orografia del sito, condizioni meteorologiche. L'energia sarà trasmessa all'ambiente sotto diverse forme, a ciascuna delle quali è associabile un danno. Riferendoci all'energia meccanica trasferita (associata all'onda d'urto che si sprigiona

dal luogo in cui è avvenuta l'esplosione) è possibile riassumere in una tabella i danni normalmente riscontrati dalle strutture per ordigni di differente potenza.

Tabella 3.1

Elenco dei danni alle strutture in funzione delle distanze dal punto zero dello scoppio (misurate in km) avvenuto in aria di un ordigno nucleare di potenza crescente (kT=kilotoni MT=megatoni)

Tipo di struttura	Danno	Potenza dell'esplosione				
		1 kT	10 kT	100 kT	1 MT	10 MT
		Distanza in km				
Edificio con intelaiatura in legno di tipo residenziale	Moderato	1	2,4	5,1	10,5	22,4
	Grave	0,75	1,8	3,8	8,8	19,2
Edificio in muratura con muri portanti per appartamenti	Moderato	0,85	1,8	3,8	7,5	16
	Grave	0,54	1,2	2,7	5,6	13,9
Edificio a più piani, con muri portanti, tipo monumentale	Moderato	0,58	1,2	2,5	5,6	11,8
	Grave	0,37	0,9	2	4,5	9,8
Edificio in cemento armato rinforzato, non antisismico, con pareti in calcestruzzo e piccole finestre	Moderato	0,45	1	2,4	5,4	11,5
	Grave	0,3	0,7	1,8	4	9,4

L'onda d'urto provoca dei venti impetuosi: nella tabella 3.2 sono riassunti i valori della velocità del vento in funzione della distanza dal punto zero, inteso, quest'ultimo, come la proiezione a terra del punto nel quale è avvenuta l'esplosione.

Tabella 3.2

Potenza dell'esplosione	Distanze in Km				
	1	2	3	5	10
1 kT	150	70	50	-	-
10 kT	450	190	100	-	-
100 kT	-	480	290	130	-
1 MT	-	-	740	380	150
10 MT	-	-	-	960	430

Velocità del vento (in km/h) in funzione della distanza dal punto zero (in km) per uno scoppio in aria di un ordigno nucleare di potenza crescente

Distanze in Km Potenza dell'esplosione

Il "muro" di pressione che si espande verso l'esterno determina delle spaventose forze di pressione capaci di spazzare via gli edifici: in questo caso, l'aumento di pressione associata all'onda d'urto è di 0.4 bar e il vento spira a 220 km/h.

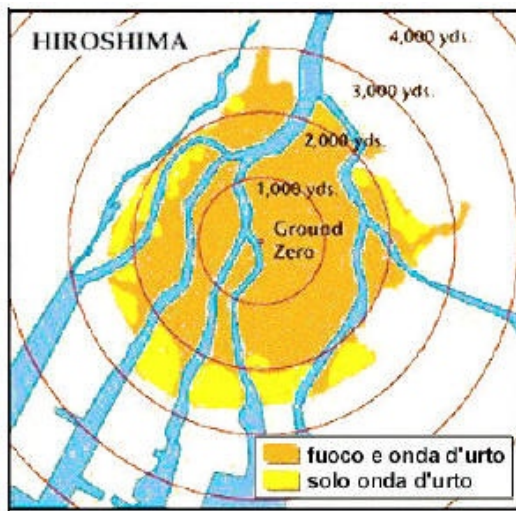


Fig.44 - Aree del territorio di Hiroshima danneggiate dall'onda d'urto e dal calore oppure dalla sola onda d'urto

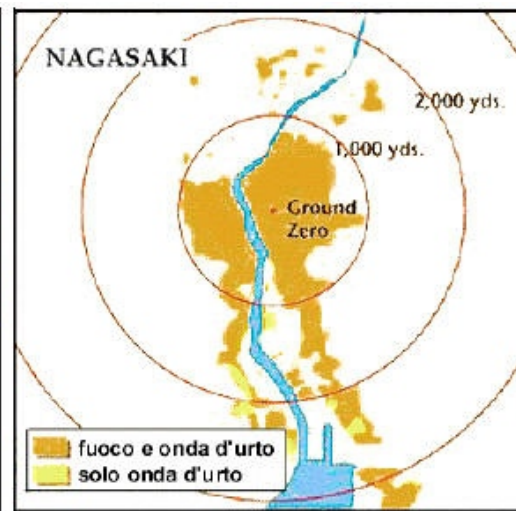


Fig.45 - Aree del territorio di Nagasaki danneggiate dall'onda d'urto e dal calore oppure dalla sola onda d'urto

Riferendoci invece all'**energia termica** associata allo scoppio riportiamo nella tabella che segue gli effetti delle radiazioni termiche sulle persone alle varie distanze in funzione della potenza dell'ordigno.

Tabella 3.3

Effetti termici kT	Massime distanze dal punto zero in metri									
	Ustioni di 3°		Ustioni di 2°		Ustioni di 1°		Focolai di incendio		Incendi gravi	
	Aereo	Superf.	Aereo	Superf.	Aereo	Superf.	Aereo	Superf.	Aereo	Superf.
10	1700	1000	2200	1300	3000	1800	2000	1200	1500	900
20	2300	1400	3000	1800	4000	2400	3000	1800	1800	1000
50	3200	2000	4000	2400	6000	3600	4000	2400	2500	1500
100	5000	3000	5500	3300	7200	4400	6000	3600	4000	2400
200	6000	3600	8000	4800	10000	6000	8000	4800	5000	3000
1000	13000	7800	16000	10000	20000	12000	15000	9000	12000	7000
5000	25000	15000	30000	18000	40000	24000	40000	24000	22000	13000
10000	35000	21000	40000	24000	60000	36000	60000	36000	30000	18000

Effetti delle radiazioni termiche sull'uomo, alle varie distanze dal punto zero (in metri) in funzione del tipo di scoppio e della sua potenza Massime distanze dal punto zero in metri

Per ciò che concerne i danni provocati dalle radiazioni emesse durante lo scoppio, parleremo nel capitolo 7 diffusamente degli effetti provocati dalla radioattività sugli esseri viventi; qui ci limitiamo a dire che, in genere, si distinguono danni arrecati da un esposizione diretta ai vari tipi di radiazione (raggi alfa, beta, gamma, X, neutroni), rispetto a quelli associati al cosiddetto **fall-out** radioattivo, ossia alla ricaduta al suolo dei radionuclidi, e alla conseguente esposizione della popolazione alla contaminazione radioattiva sia in loco sia a migliaia di km di distanza. Per quanto riguarda l'esposizione diretta, in figura 46 diamo una stima della mortalità indotta da esposizione diretta alle radiazioni.

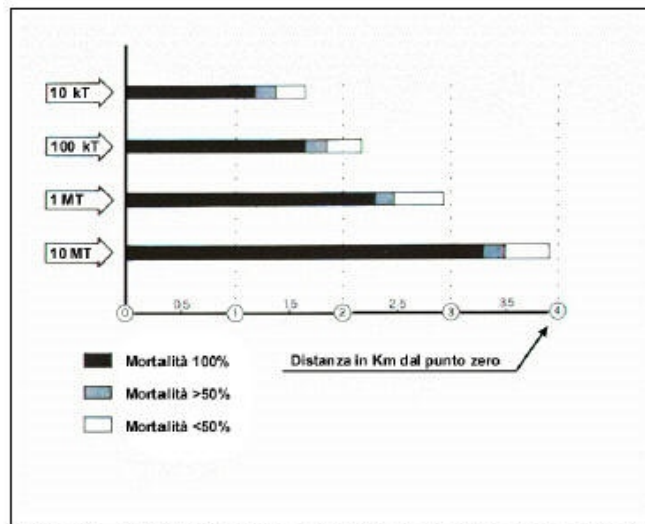


Fig. 46 - Mortalità dovuta all'effetto radioattivo immediato in funzione della distanza dal punto zero (in km) e della potenza dell'ordigno

Il danno associato al fall-out implica invece scale spaziali e temporali di riferimento assai più estese. Il fall-out si determina quando i radionuclidi emessi nell'esplosione nucleare vanno a rivestire particelle di polvere presenti nell'atmosfera. L'effetto è maggiore quando lo scoppio si verifica a basse quote, infatti, in questo caso, si creano correnti ascensionali che convogliano consistenti quantità di polvere dal suolo fin dentro al cuore del fungo nucleare, per poi essere diffuse dalle correnti in quota dell'atmosfera. Nelle esplosioni in alta quota, invece, i radionuclidi condensano su particelle di polvere così piccole che possono passare anni prima che essi facciano ritorno al suolo, e quando ciò avviene la loro radioattività si è attenuata in modo considerevole. Avremo modo più avanti di tornare a parlare del fall-out radioattivo determinatosi a seguito di incidenti nelle centrali nucleari.

3.5 IMPIEGHI CIVILI DELL'ENERGIA NUCLEARE

3.5.1 Introduzione

L'energia nucleare è di gran lunga una delle forme di energia più concentrate dal momento che 1 kg di uranio sviluppa una energia termica pari a 100 000 kWh a fronte degli 8kWh sviluppati da un analogo quantitativo di carbone. E' questo il motivo che ha indotto molti paesi (vedi Tab. 3.4) a sfruttare questa forma di energia per il funzionamento delle centrali elettriche.

Tabella 3.4

Produzione di energia elettrica con reattori a fissione nel 1989: si noti che, a seguito del referendum antinucleare del 1988, in Italia attualmente non sono più in funzione centrali nucleari

Paese	Numero di reattori nucleari in esercizio	Percentuale dell'energia elettrica totale prodotta con reattori nucleari
Canada	18	16%
Francia	55	75%
Germania dell'Est	5	11%
Germania dell'Ovest	22	34%
Giappone	38	24%
Regno Unito	39	23%
Italia	0	0%
Stati Uniti	110	18%
Svizzera	5	42%

Si pensi che una centrale elettronucleare (cioè che produce energia elettrica sfruttando la fissione nucleare) da 1000 megawatt consuma, nell'arco di un anno, 27 tonnellate di uranio arricchito, mentre una centrale termoelettrica della stessa potenza consuma, nello stesso periodo, 1.500.000 tonnellate di petrolio. Nel caso della fusione che, come vedremo, l'uomo sta cercando di utilizzare per la produzione di energia elettrica, il rapporto è ancora più favorevole.

3.5.2 Il reattore a fissione

Il funzionamento di una centrale elettrica convenzionale (cioè non nucleare) si basa su un unico principio base: una turbina è posta in movimento dall'energia cinetica trasmessale da un fluido; essa è accoppiata a un alternatore che a sua volta trasforma l'energia cinetica in energia elettrica. Nelle centrali idroelettriche è l'acqua a far girare la turbina, mentre nelle centrali termoelettriche è il calore prodotto da combustibili fossili (gas, carbone, petrolio) a produrre il vapore che fa girare la turbina. Nelle centrali nucleari è l'uranio a rivestire il ruolo di combustibile: provocandone una reazione di fissione controllata si produce infatti il calore necessario alla vaporizzazione dell'acqua. La prima reazione a catena controllata venne effettuata nel 1942 a Chicago da Enrico Fermi.



Fig.47 - La pila atomica di Fermi: rappresentazione artistica dell'esperimento relativo alla prima reazione nucleare controllata (The National Atomic Museum, Chicago)

6 tonnellate di uranio, 34 tonnellate di ossido di uranio e 400 tonnellate di grafite costituivano quella che venne chiamata "la pila di Fermi" avente una potenza irrisoria di soli 0,5 watt, ma che fu una tappa fondamentale per la successiva messa a punto del primo ordigno nucleare sganciato sul Giappone tre anni dopo.

I neutroni e la reazione a catena

Come abbiamo già visto, in ogni fissione si producono in media da due a tre neutroni di energia elevata che si spostano a grande velocità (20 000 km/s) da un atomo di uranio all'altro. Questa velocità è in realtà controproducente per il buon esito della reazione: essi vanno opportunamente rallentati, come si preciserà meglio più avanti, per mezzo di materiale "moderatore" inserito in mezzo al combustibile nucleare. L'energia posseduta dai neutroni è una piccola frazione di quella liberata dalla fissione, dal momento che il grosso dell'energia prodotta viene assorbito dai nuclei fissionati, tuttavia, in virtù della loro piccola massa, la velocità dei neutroni è elevata. Essi perciò si comportano come dei proiettili di piccole dimensioni che, essendo neutri, possono percorrere apprezzabili distanze prima di collidere su un nucleo di uranio. I due o tre neutroni generati in ciascuna fissione, possono a loro volta provocare nuove fissioni in una crescita esponenziale del processo che viene per l'appunto chiamato reazione a catena.

Il combustibile

Il combustibile adoperato in una centrale nucleare è formato da materiale fissile di vario tipo: normalmente quello più utilizzato è l'uranio naturale arricchito in uranio 235 ma esistono reattori che sfruttano anche il plutonio 239.

Le barre di controllo

In un reattore nucleare la reazione a catena deve essere continuamente controllata perché il ritmo di fissione dei radioisotopi rimanga costante nel tempo e non aumenti. Questo si ottiene facendo sì che se la reazione ha prodotto tre neutroni, due vengano catturati e solo uno vada a fissionare un altro nucleo pesante: in tal modo l'energia viene prodotta a rateo costante (sotto forma di calore) e, rimossa continuamente mediante il fluido refrigerante, non provoca effetti distruttivi per il reattore.

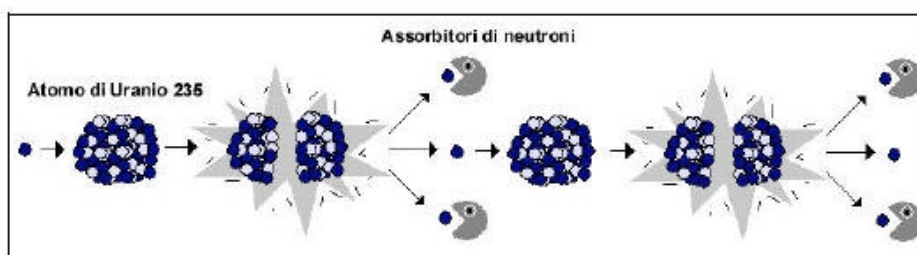


Fig.48 - Il controllo della reazione a catena mediante l'assorbimento dei neutroni in eccesso da parte della sostanza contenuta nelle cosiddette "barre di controllo"

Il controllo della reazione in un reattore è assicurato grazie alla presenza di "barre di controllo"; esse contengono materiale (cadmio, boro) in grado di assorbire con grande efficienza i neutroni. Le barre possono essere meccanicamente abbassate, oppure sollevate: nel primo caso risultano affiancate al materiale fissile (anch'esso

racchiuso in barre cilindriche), nel secondo caso risultano estratte; mediante questo movimento la reazione può essere spenta (barre inserite) oppure fortemente accelerata (barre rimosse).

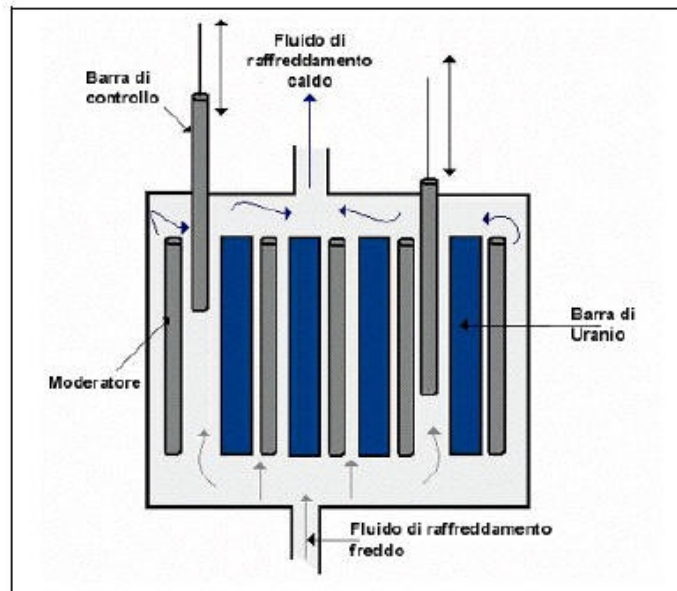


Fig.49 - Il "nocciolo" di un reattore nucleare

Il moderatore

Come abbiamo già accennato, la sostanza moderatrice riveste un ruolo cruciale perché la reazione abbia luogo. Normalmente i neutroni prodotti dalla fissione sono troppo veloci (20000 km/s) perché i loro urti risultino efficaci: questa velocità deve essere drasticamente ridotta a 2 km/s. In questo caso gli urti tra questi neutroni "lenti" o "termici" risultano in grado di fissionare i nuclei pesanti. La sostanza moderatrice non assorbe i neutroni (come fa invece la sostanza contenuta nelle barre di controllo) ma si limita a frenarli mediante l'ostacolo offerto ai neutroni dai suoi atomi. Questi atomi debbono avere una massa non molto diversa da quella dei neutroni e per questo quasi sempre i moderatori sono a base di idrogeno (Enrico Fermi, alle prese con i primissimi esperimenti sulla fissione a Roma nel 1934, scoprì questo potere di rallentamento efficacissimo delle sostanze a base di idrogeno, adoperando come moderatore la paraffina). In alcuni casi il moderatore è costituito da un materiale interposto tra le barre di combustibile e le barre di controllo; assai spesso tuttavia è lo stesso refrigerante (acqua) che svolge anche la funzione di moderatore. C'è da aggiungere che esistono attualmente dei reattori a neutroni veloci (per es. la centrale francese Phoenix) che non hanno necessità di rallentare i neutroni ma richiedono particolari combustibili.

Il refrigerante

L'energia prodotta sotto forma di calore deve essere recuperata per poi essere trasformata in energia elettrica. Il fluido scambiatore di calore che circola fra le barre di combustibile nucleare (o come si dice anche nel "nocciolo del reattore"), con il duplice scopo di assorbire calore da convertire in energia elettrica e di mantenere a una temperatura controllata il materiale fissile, viene detto refrigerante. In realtà il fluido non è a diretto contatto con il combustibile per evitare sia che particelle radioattive possano fuoriuscire dal nocciolo, sia l'innescò di reazioni chimiche tanto nel combustibile che nel fluido. Nei reattori PWR (Fig. 50) il refrigerante viene inviato in un generatore di vapore che sottrae calore producendo vapore sotto pressione a sua volta inviato a una turbina accoppiata all'alternatore elettrico.

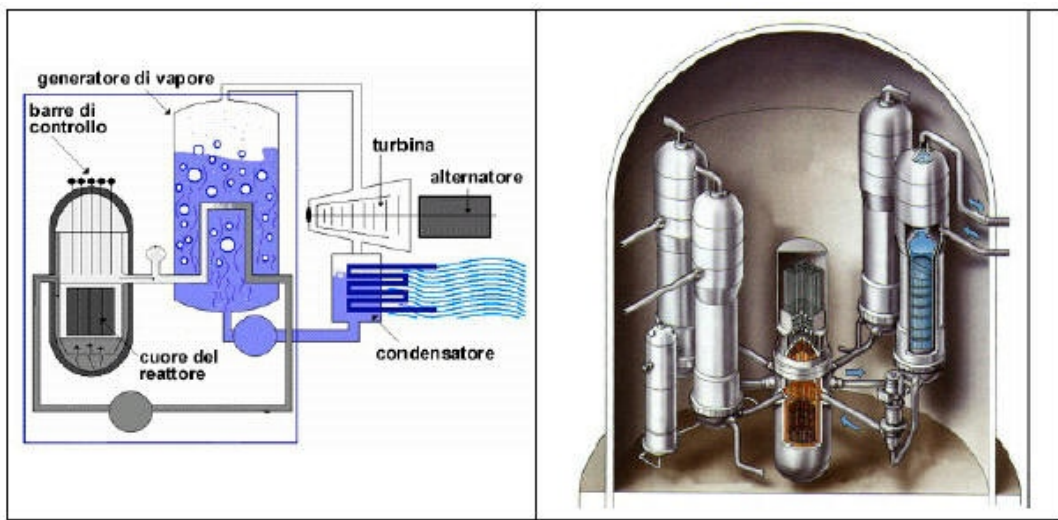


Fig.50 - Vista schematica un reattore a fissione ad acqua a pressione (detto anche PWR, Pressurized Water Reactor) avente una potenza tipica di 1000 megawatt

Fig.51 - Vista tridimensionale dello stesso tipo di reattore della figura precedente

In altri tipi di reattore, detti ad acqua bollente (BWR) il refrigerante (acqua) attraversando il nocciolo bolle, producendo vapore che viene inviato direttamente alla turbina. Gli elementi che vengono prodotti nella fissione sono moltissimi: ad esempio nel caso dell'uranio 235 sono una trentina e molti di essi costituiscono un vero e proprio "veleno" per il reattore in quanto assorbono i neutroni lenti e tendono a interrompere la reazione a catena. Pertanto, dopo un certo periodo di funzionamento, è necessario estrarre dal reattore le barre di combustibile e inviarle a un impianto di ritrattamento chimico dove i materiali che le compongono vengono privati dai prodotti della fissione. In occasione di queste operazioni si estrae anche il plutonio 239 che si è andato formando a partire dall'uranio 238 e che può essere utilmente sfruttato in altri tipi di reattori ma purtroppo anche per costruire ordigni nucleari.

3.5.3 Lo smaltimento delle scorie nucleari

In un moderno reattore dopo tre anni di funzionamento vengono prodotti da ciascun elemento di combustibile circa 35 kg di prodotti di fissione (molto più leggeri dell'uranio) e circa 9 kg di transuranici (cioè aventi un numero atomico superiore a quello dell'uranio): le scorie sono pertanto fortemente radioattive. L'85% dei prodotti di fissione radioattivi hanno vite medie inferiori a un anno; mentre gli elementi transuranici hanno vite medie molto maggiori, dell'ordine dei 100.000 anni e più: pertanto la maggior parte della radioattività è inizialmente dovuta ai prodotti di fissione, e, solo a tempi lunghissimi, ai transuranici. Dunque lo smaltimento delle scorie è un problema sia a tempi brevi rispetto alla durata della vita umana, sia a tempi lunghi e lunghissimi. Gli elementi di combustibile esauriti vengono dapprima posti in piscine di raffreddamento per tempi variabili da qualche mese a qualche anno. Successivamente, è possibile schermarli in contenitori a secco, che dovranno essere custoditi in idonei depositi, oppure inviarli al riprocessamento chimico, cui si è accennato. Qui si riesce a estrarre ancora uranio e plutonio, mentre il residuo viene solidificato mediante l'aggiunta di opportuno inerte (per es. vetrificato) e posto in contenitori d'acciaio, da custodire sempre in idonei depositi.



Fig.52 - Scorie radioattive immerse in una piscina



Fig.53 - Fusti contenenti scorie radioattive



Fig.54 - Il ritrattamento chimico del combustibile "esausto" può avvenire anche a migliaia di chilometri di distanza: i problemi legati al trasporto, anche via mare, delle scorie sono delicatissimi

3.5.4 L'incidente nel reattore di Chernobyl

Nella notte tra il 25 e il 26 aprile 1986 gli operatori addetti al reattore numero quattro della centrale di Chernobyl, una città dell'Ucraina nell'ex Unione Sovietica, iniziarono ad attuare una serie di test per verificare la capacità operativa del loro più moderno reattore. Secondo i rapporti ufficiali, gli operatori, senza autorizzazione, disattivarono il sistema di sicurezza e non rispettarono le procedure standard relative alla conduzione dei test. A un certo punto essi persero il controllo delle reazioni nucleari, la produzione di energia crebbe fino a 120 volte la sua capacità prevista, provocando la rottura di alcune parti del nocciolo. L'acqua di raffreddamento del sistema si trasformò immediatamente in vapore, innescando una potentissima esplosione che spazzò via la copertura del reattore, del peso di 1000 tonnellate, e lanciò nel cielo un getto di combustibile nucleare bollente.



Fig.55 - Il reattore numero quattro subito dopo lo scoppio: la copertura della centrale risulta visibilmente danneggiata

Il reattore fu immediatamente avvolto dalle fiamme; per estinguerle furono necessari più di dieci giorni di lavoro delle squadre dei pompieri. Durante questo periodo venne immessa nell'ambiente una considerevole quantità di radionuclidi quantificabile in 1000 volte quella a suo tempo rilasciata in un altro grave incidente avvenuto nel 1979 nel reattore di Three Mile Island, negli Stati Uniti. Il principale radionuclide rilasciato nell'atmosfera fu il cesio 137 caratterizzato da un periodo di dimezzamento di 30 anni. Le conseguenze di questo incidente risultarono estremamente gravi nelle zone circostanti Chernobyl. Nel tentativo di contenere il disastro morirono una trentina di persone, tecnici, vigili del fuoco, piloti di elicotteri che si esposero alla morte atomica per salvare altre migliaia di vite. Senza considerare lo spaventoso incremento di tumori alla tiroide fra i giovani che allora erano soltanto bambini, le malformazioni, nonché l'esodo coatto avvenuto nel 1986 di decine di migliaia persone evacuate dalle zone più inquinate. La nube radioattiva fuoriuscita si spostò spinta dal vento, in direzione nord ovest e quando in seguito piovve, il materiale radioattivo ricadde al suolo. Il fall-out interessò più di venti paesi europei per un totale di circa 100 milioni di persone.

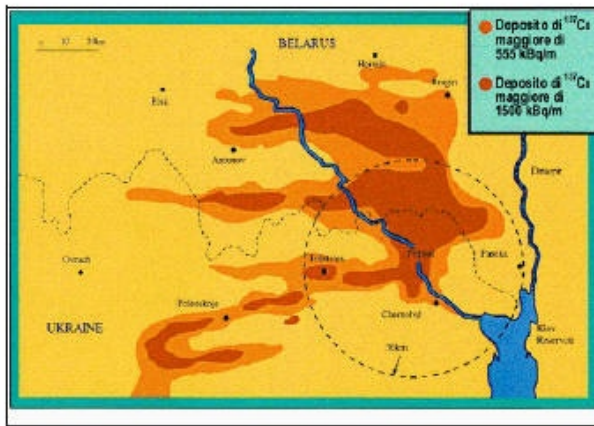


Fig.56 - Presenza del radionuclide cesio 137 nell'area attorno la centrale: in grigio scuro valori riscontrati superiori a 1500 kBq/m², in grigio chiaro superiori a 555 kBq/m²

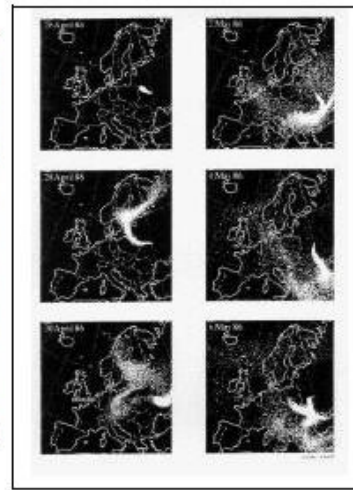


Fig.57 - Diffusione della nube radioattiva nei cieli dell'Europa nei giorni immediatamente successivi a quello dell'incidente

3.5.5 Prospettive per il futuro: il reattore nucleare a fusione

...omissis...

4.3 IMPIEGHI CIVILI E MILITARI DI ALCUNI RADIONUCLIDI

4.3.1 Uranio impoverito

Esistono in natura tre tipi di isotopi dell'uranio caratterizzati da numeri di massa pari a 234, 235, 238. La loro abbondanza nei minerali di uranio è rispettivamente dello 0,0055%, 0,71% e 99,2845%. Il combustibile adoperato nei reattori nucleari è costituito dal cosiddetto uranio arricchito, un miscuglio di uranio 238 (presente al 96%) e di uranio 235 (presente al 4%), ottenuto dall'arricchimento" del più diffuso e meno pregiato uranio naturale. L'uranio residuo, scarto del processo di arricchimento, viene definito **uranio impoverito** (o depleto) e contiene una percentuale di U235 di circa lo 0,2%. Il motivo per cui anche questa forma meno pregiata di uranio trova applicazione nell'industria civile e militare non è legato alle sue proprietà radioattive, bensì alla sua elevatissima densità. Oltretutto il suo costo è estremamente basso, dal momento che l'uranio impoverito è considerato un prodotto di scarto dell'industria nucleare. Attorno agli anni settanta è il settore militare a sfruttare questo materiale per rinforzare le strutture dei mezzi blindati, ma soprattutto per costruire munizioni dotate di un elevatissimo potere di penetrazione, visto che l'uranio ha una densità tre volte maggiore di quella dell'acciaio (Fig.68).



Fig.68 - Un proiettile anticarro ad elevata penetrazione contenente al suo interno uranio impoverito

La guerra del Golfo nel 1991 fu il primo teatro di guerra in cui vennero adoperate queste armi: si calcola che circa seimila colpi sparati da carri armati e circa un milione da aerei, contenessero al loro interno l'uranio impoverito. Nella guerra nella ex Jugoslavia numerose zone del Kosovo vennero attaccate dalla aviazione americana con proiettili contenenti uranio impoverito. I danni maggiori provocati da questo materiale, al di là della maggiore efficienza distruttiva garantita al proiettile, vanno imputati, oltreché alla sua tossicità chimica, alla emissione radioattiva associata alla natura instabile dell'uranio 238 il quale, come abbiamo visto nel capitolo 2, è il capostipite di una delle tre famiglie radioattive. Il rischio maggiore si ha ove l'uranio impoverito, a seguito dell'esplosione venga inalato o assorbito dalle ferite. In questo caso l'effetto delle radiazioni emesse può causare seri danni alla salute. Se inalato può depositarsi nei polmoni provocando fibrosi ed enfisemi; una volta assorbito dall'apparato circolatorio si deposita nel fegato, nei reni e nelle ossa continuando a irradiare i tessuti per anni. Anche l'industria civile dei trasporti ha fatto uso dell'uranio impoverito. In particolare le industrie produttrici di alcuni aeromobili di grandi

dimensioni, i cosiddetti "wide body", avendo la necessità di inserire nelle ali dei notevoli contrappesi per garantire la stabilità di volo, hanno pensato di sfruttare l'uranio impoverito per il suo minimo ingombro volumetrico a fronte dell'elevatissima massa. Seppure debitamente schermati, questi contrappesi hanno creato allarmi, specialmente per le conseguenze che essi possono arrecare ai soccorritori in caso di disastro aereo. A fronte dell'allarme sollevato da numerose associazioni impegnate nella tutela della salute, negli ultimi anni le industrie del settore si sono attivate per sostituire queste parti con altre realizzate con materiali meno pericolosi (ad es. tungsteno). Impiegate nella costruzione degli aerei, ha fatto sì che il problema relativo alla tutela della salute dei soccorritori e delle eventuali popolazioni coinvolte in caso di disastro, venisse riconosciuto dalle stesse aziende costruttrici. Sono attualmente disponibili (vedi Tabella 4.4) dati che descrivono, nei diversi aeromobili, la presenza di apparecchiature contenenti sostanze radioattive con la specifica dei differenti livelli di tossicità (per le unità di misura adoperate per stima della radioattività, vedi cap. 5).

Tabella 4.4

Componenti radioattivi presenti su aeromobili (Fonte Comando VV.F. Roma)

TIPO AEROMOBILE	IMPIEGO	ATTIVITA'	ISOTOPO	- tipo emissione - periodo dimez. - classe tossicità	DESCRIZIONE
AEROMOBILI ALITALIA	Ricetrasmittitori radar	4.6 MBq = 124µCi o in alternativa	COBALTO 60	β,γ 5.27 anni II K=1.36	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate
	Limitatore di trasmissione e ricezione	0.46 MBq = 12.4 µCi 0.92 MBq = 24 µCi	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate
	Ricetrasmittitori radar	4.6 MBq = 124µCi o in alternativa	COBALTO 60	β,γ 5.27 anni II K=1.36	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate
	Valvola di trasmissione e ricezione	4.6 MBq = 124µCi	PROMEZIO 147	β,γ 2.62 anni III	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate
	Ricetrasmittitori radar	37 kBq = 1 µCi o in alternativa	CRIPTON 85	β,γ 10.72 anni IV	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate
	Scintillatore	33 kBq = 0.9 µCi	CESIO 137	β,γ 30 anni II K=0.37	Componenti incapsulati e posti in scatole sigillate 65
	Scatole di accensione (Motori)	185 kBq = 5 µCi per un totale di 740 kBq = 20 µCi	CRIPTON 85	β,γ 10.72 anni IV	Cilindri di vetro riempiti

TIPO AEROMOBILE	IMPIEGO	ATTIVITA'	ISOTOPO	- tipo emissione - periodo dimez. - classe tossicità	DESCRIZIONE
BOEING 747/200 soffitto cabina passeggeri	Segnali autoluminescenti USCITA-EXIT (n° 2 segnali)	259 GBq = 7 Ci (per ognuno dei segnali)	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Fialette sigillate (annegate in resina epossidica)
AIRBUS INDUSTRIES A300B soffitti stive merci	Rilevatori di fumo (n° 10 rilevatori)	30 kBq = 0.8 μCi (per ognuno dei rilevatori)	AMERICIO 241	α,γ 432.20 anni I	
AIRBUS INDUSTRIES A321 soffitti stive merci	Rilevatori di fumo (n° 14 rilevatori)	30 kBq = 0.8 μCi (per ognuno dei rilevatori)	AMERICIO 241	α,γ 432.20 anni I	
DOUGLAS TIPO MD - 80 soffitto cabina passeggeri	Segnali autoluminescenti USCITA-EXIT (n° 20 segnali)	148 GBq = 4 Ci (per ognuno dei segnali)	TRIZIO	β 12.35anni IV	Fialette sigillate (annegate in resina epossidica)
DOUGLAS TIPO MD - 80 cabina di pilotaggio	Indice di compensazione alettone (trizio in capsula)	185 MBq = 5 mCi	TRIZIO	β 12.35anni IV	Dispositivi plastici in capsule contenenti all'interno gas trizio radioattivo
DOUGLAS TIPO MD - 80 cabina di pilotaggio	Targhetta graduata di compensazione timone (trizio in fiale)	144 MBq = 3.9 mCi	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Dispositivi plastici in fiale contenenti all'interno gas trizio radioattivo
DOUGLAS TIPO MD - 80 cabina di pilotaggio	Indice di compensazione timone (trizio in capsula)	185 MBq = 5 mCi	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Dispositivi plastici in capsule contenenti all'interno gas trizio radioattivo
DOUGLAS TIPO MD - 80 cabina di pilotaggio	Targhetta graduata di compensazione timone (trizio in fiale)	174 GBq = 4.7 mCi	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Dispositivi plastici in fiale contenenti all'interno gas trizio radioattivo
DOUGLAS DC- 9/ 30 cabina passeggeri cabina di pilotaggio	Segnali autoluminescenti USCITA-EXIT (n° 10 segnali)	148 GBq = 4 Ci (per ognuno dei segnali)	TRIZIO	β 12.35 anni IV	Fialette sigillate (annegate in resina epossidica)

4.3.2 Applicazioni in campo medico

L'esposizione dei tessuti viventi a radiazioni può provocare in essi alterazioni funzionali e strutturali. Uno dei risultati di tali alterazioni può essere la distruzione cellulare del tessuto irradiato che è l'effetto generalmente desiderato nella terapia dei **tumori** per mezzo di radiazioni (**radioterapia**).

APPROFONDIMENTO

La radioterapia si basa sul fatto che, rispetto alle cellule tumorali, i tessuti normali hanno una maggiore capacità di guarigione dagli effetti provocati dalle radiazioni. Pertanto una dose di radiazioni sufficiente a distruggere le cellule tumorali compromette solo temporaneamente quelle sane vicine. Le tecniche radioterapiche si suddividono in:

- teleradioterapia (acceleratori come tubi a raggi X oppure sostanze radioattive gamma emettitrici come il Cobalto 60 o il Cesio 137, convogliano la radiazione dall'esterno sul focolaio);
- curieterapia (sorgenti radioattive gamma come il Radio 226, il Cobalto 60, l'Iridio 192 o il Cesio 137 vengono poste a diretto contatto del tumore).



Fig.69 - Unità per telecobaltoterapia: la testata può contenere una sorgente di cobalto 60 ed è provvista di un collimatore per regolare la sezione de fascio

Un altro settore nel quale vengono adoperati radionuclidi è la cosiddetta **radiodiagnostica**. Si ottengono così informazioni sui processi vascolari e metabolici mediante i quali il radionuclide, somministrato al paziente in piccole dosi, si distribuisce in un certo organo.

APPROFONDIMENTO

Si possono usare diversi isotopi: quelli che emettono radiazioni gamma e in questo caso si parla di tomografia a emissione di fotone singolo (SPECT); oppure quelli che emettono positroni (che poi producono a loro volta altri fotoni) e in questo caso si parla di tomografia a emissione di positroni (PET).

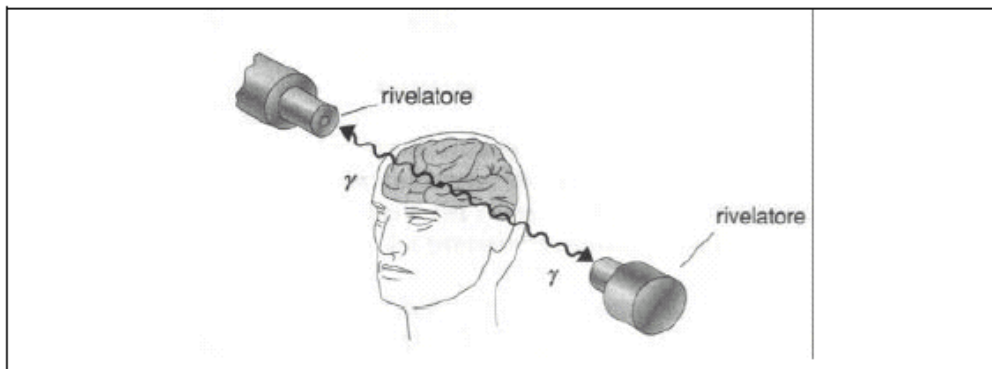


Fig.70 - Tomografia a Emissione di Positroni : il positrone emesso dal radionuclide che ha raggiunto il cervello, decade in due fotoni intercettati dai due rivelatori gamma contrapposti: l'immagine si ottiene rielaborando al computer i dati provenienti da tutti i radionuclidi presenti nella zona sotto esame

Speciali macchine chiamate gamma camere consentono di misurare l'intensità e la direzione della radiazione gamma proveniente dai radionuclidi, dando origine così a una visualizzazione dei tessuti interni.

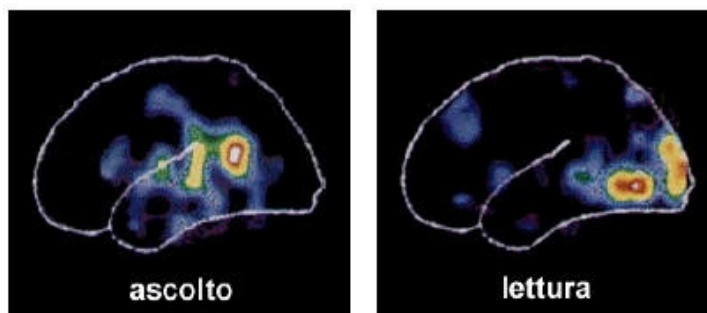


Fig.71 a, b - Visualizzazione mediante Tomografia a Emissione di Positroni di aree del cervello maggiormente attive durante l'ascolto e durante la lettura di parole

5. INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI CON LA MATERIA

5.1 LE RADIAZIONI IONIZZANTI

I diversi tipi di radiazioni (alfa, beta e gamma) emessi da nuclei radioattivi provocano nel loro passaggio nella materia una ionizzazione, diretta o indiretta, ossia rompono i legami tra gli elettroni e gli atomi creando un uguale numero di cariche positive e negative. Le particelle alfa (pesanti e di carica positiva), quelle beta (elettroni leggeri e di carica negativa) e la radiazione gamma (fotoni privi di massa e carica) interagiscono secondo meccanismi fisici

diversi. **Le particelle alfa** (nuclei di elio composti da due neutroni e due protoni) trasformano rapidamente la loro energia cinetica in ionizzazione del mezzo; nel loro passaggio all'interno della materia la forza elettrica attrattiva che esercitano sugli elettroni

(Fig.78) produce la ionizzazione diretta di molti atomi che perdono elettroni.

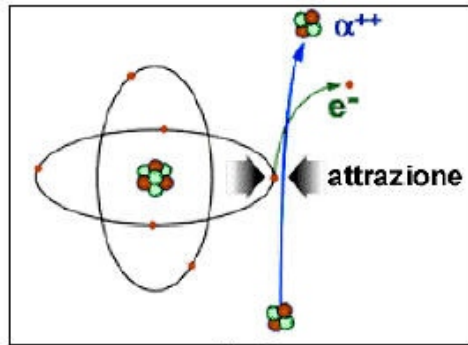


Fig.78

Gli elettroni liberati, a loro volta, causano una ionizzazione secondaria. L'energia necessaria per rompere il legame atomico "rallenta" la particella alfa che persa tutta la sua energia cinetica forma un atomo di elio legando a sé due elettroni. In aria una particella alfa di energia tipica emessa dai radionuclidi più comuni percorre pochi centimetri 1 producendo decine di migliaia di ionizzazioni per ogni centimetro attraversato. Oltre alla ionizzazione la radiazione alfa può provocare l'eccitazione dell'atomo (il passaggio di un elettrone ad un livello energetico superiore). Ne segue una riemissione di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica di bassa energia (non ionizzante) nel campo dell'infrarosso e in alcuni casi (scintillatori) nel visibile.

1 E' incapace di attraversare un sottile foglio di carta o la pelle di una persona.

Le particelle beta, migliaia di volte più leggere di quelle alfa, interagiscono più debolmente con la materia percorrendo tratti molto più lunghi. Il loro potere penetrante risulta così centinaia di volte superiore rispetto a radiazione alfa di uguale energia. Anch'esse producono una ionizzazione diretta, esercitando una forza repulsiva sugli elettroni atomici, capace in aria di produrre fino a decine di ionizzazioni per ogni centimetro percorso. Anche le particelle beta provocano l'eccitazione degli atomi del mezzo attraversato con riemissione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche. Un effetto secondario che accompagna il passaggio della radiazione beta nella materia è la perdita di energia per irraggiamento 1 poiché la carica, variando la sua velocità nel passaggio all'interno dell'atomo, emette raggi x.

La radiazione gamma viene invece assorbita dalla materia su tratti lunghissimi seguendo tre diversi meccanismi fisici che dipendono dall'energia della radiazione stessa. A basse energie prevale il cosiddetto effetto fotoelettrico, a medie energie l'effetto interpretato dal fisico Compton, a grandi energie la creazione di coppie di elettroni negativi e positivi (positroni).

Tabella 5.1

Radiazione alfa	Percorsi brevi nella materia	Ionizzazione ed eccitazione
Radiazione beta	Percorsi intermedi	Ionizzazione ed eccitazione Emissione di raggi x
Radiazione gamma	Percorsi lunghissimi	Effetto fotoelettrico Effetto Compton Creazione di coppie

5.2 EFFETTI FISICI DELL'INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE GAMMA CON LA MATERIA

5.2.1 Effetto fotoelettrico

Già nel 1887 il fisico tedesco Hertz aveva scoperto che irradiando con radiazione ultravioletta una lastra di zinco questa si caricava positivamente. Il fenomeno è dovuto all'emissione di elettroni da parte della superficie metallica "illuminata".

1 Il termine tecnico usato in fisica per tale fenomeno è Bremsstrahlung o radiazione di frenamento.

Nell'interazione tra radiazione e materia l'energia della radiazione (proporzionale alla sua frequenza) si trasforma completamente in energia cinetica degli elettroni colpiti. I quali, in determinate condizioni, possono allontanarsi dagli atomi di appartenenza vincendo l'energia di legame (Fig.79).

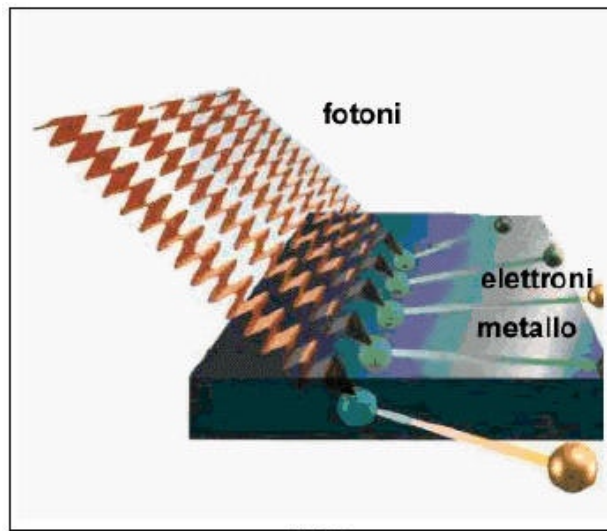


Fig.79

L'effetto, indicato come fotoelettrico, è un fenomeno che non riguarda solo i metalli, ma qualsiasi sostanza (solida, liquida e gassosa) irradiata da radiazioni gamma. La schematizzazione del fenomeno completo per ciò che riguarda la radiazione gamma è la seguente: il fotone (la radiazione) trasferisce tutta la sua energia ad un elettrone che si allontana dall'atomo e il suo posto viene occupato da altri elettroni che si trovano su livelli (energetici) più esterni. La transizione in genere implica l'emissione di radiazione x (Fig.80).

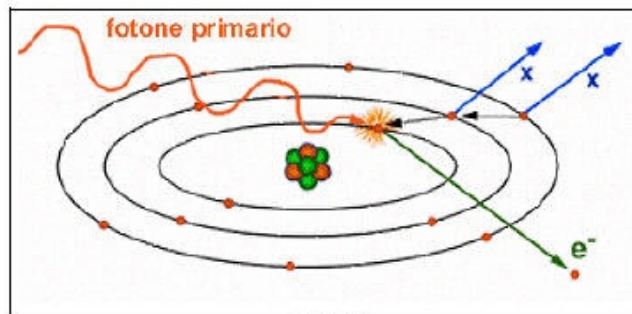


Fig.80

5.2.2 Effetto Compton

Se nel fenomeno descritto precedentemente un fotone di una certa frequenza cede completamente la sua energia ad un elettrone, nell'interazione fotone-elettrone dell'effetto Compton ciò non avviene. In una sorta di urto tra due particelle l'elettrone acquista energia cinetica, mentre il fotone con una frequenza minore di quella di partenza viene diffuso (Fig.81). Questo effetto si verifica di solito per energie del fotone maggiori di quelle del caso precedente.

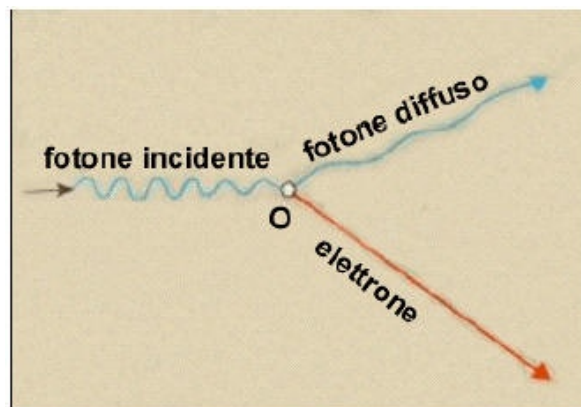


Fig.81

5.2.3 Produzione di coppie

Ad energie sufficientemente elevate un fotone, interagendo a distanza con un nucleo, o, più raramente, con un elettrone, può trasformare tutta la sua energia in due particelle cariche: l'elettrone e il positrone (Fig.82), secondo un fenomeno regolato dalla famosa equazione di Einstein di trasformazione massa-energia¹.

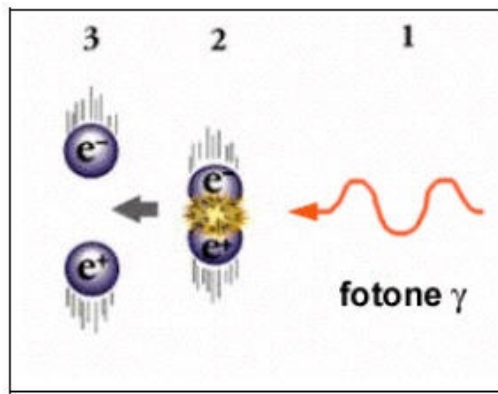


Fig.82

L'energia minima necessaria alla radiazione gamma per produrre un simile effetto, nel caso d'interazione con il nucleo, è pari a circa un milione di elettronvolt (ovvero l'energia che avrebbe un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di un milione di volt²).

5.3 LE GRANDEZZE FISICHE E LE UNITÀ CARATTERIZZANTI LA RADIOATTIVITÀ

Nello studio della radioattività e dell'interazione di questa con la materia si possono individuare **quattro aspetti diversi**, ognuno dei quali porta all'introduzione di una o più grandezze fisiche. L'argomento, assai complesso, sarà così suddiviso in più momenti. Vediamo innanzitutto quali siano i quattro aspetti da considerare. Il **primo** è legato all'esame della sorgente radioattiva; il radionuclide emette radiazioni di una certa energia (si veda la tabella che segue), effettuando un numero più o meno grande di disintegrazioni al secondo. L'attività del singolo radionuclide,

1 L'equazione di Einstein è $E = mc^2$, con c velocità della luce, m massa, E energia. In questo caso la soglia di attivazione del processo deve essere tale che l'energia di partenza E_{FOTONE} sia maggiore delle energie delle due particelle create. (energia complessiva $2mc^2$)

2 A questa energia corrisponde una frequenza per la radiazione pari a $2,46 \cdot 10^{20}$ hertz (Hz) come è stato già ricordato, è caratterizzata da un tempo caratteristico (tempo di dimezzamento o emivita) sempre uguale e costante.

Tabella 5.2

Energia delle principali radiazioni emesse dal radionuclide (MeV) Radionuclide Radiazioni alfa Radiazioni beta Radiazioni gamma

Radionuclide	Radiazioni alfa	Radiazioni beta	Radiazioni gamma
Uranio 238	4,198 4,149		0,048
Potassio 40		1,311 6	1,461
Torio 232	4,01 3,952 3,828		0,059
Carbonio 14		0,1565	
Cobalto 60		1,17 1,33	
Iodio 131		0,08 0,28 0,36 0,64 0,72	
Radio 226	4,784		0,186
Radon 222	5,59		0,512

Il **secondo** aspetto è legato allo studio del campo di radiazioni generato dalla sorgente nello spazio circostante. Possono essere così misurate le cariche create nell'aria (esposizione di ionizzazione) o l'energia cinetica delle particelle ionizzate (kerma).

Il **terzo** aspetto consiste nel valutare l'assorbimento della radiazione ionizzante da parte della materia esposta al campo delle radiazioni (dose assorbita).

Infine si può studiare il rilascio di energia della radiazione ionizzante che attraversa parti del corpo umano tenendo conto dei diversi effetti biologici, introducendo così la dose equivalente e la dose efficace. Gli effetti biologici saranno l'oggetto di due capitoli a sé stanti (il settimo e l'ottavo). Nei paragrafi successivi tratteremo delle altre grandezze. Nella tavola che segue sono riassunte le considerazioni precedenti. (Tab. 5.3).

Studio	Fenomeno fisico	Grandezze
Sorgente radioattiva	Disintegrazione nucleare	Attività Tempo di dimezzamento Energia delle radiazioni
Campo di radiazioni in aria	Ionizzazione provocata dai raggi gamma	Esposizione di ionizzazione Kerma in aria
Interazione con la materia	Rilascio di energia ionizzante nell'unità di massa della sostanza	Dose assorbita
Interazione con gli organismi	Rilascio di energia ionizzante all'interno delle cellule	Dose equivalente Dose efficace

Tabella 5.3

5.3.1 Attività e sua unità di misura

La pericolosità di una sostanza che emette radiazioni ionizzanti può essere misurata, in prima approssimazione, dalla sua attività, ossia dal numero di disintegrazioni nucleari al secondo che avvengono in essa, poiché ad ogni disintegrazione nucleare corrisponde l'emissione di radiazioni alfa, beta o gamma. Per la scelta dell'unità di misura dell'attività si è presa come riferimento una determinata quantità di una sostanza radioattiva: un grammo di radio. All'attività di 1 grammo di radio, è storicamente associato il nome dell'unità di misura curie simbolo Ci, cui corrispondono $3,7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni al secondo.

APPROFONDIMENTO

In realtà l'attività è quella del radio in equilibrio con il radon da esso emesso. Se si prende una sorgente di radio racchiusa in un recipiente e si aspetta un certo tempo (diciamo un mese) il recipiente si riempie di una quantità fissa di gas radon a seguito delle disintegrazioni del radio. L'equilibrio tra il radon radioattivo che tende a trasformarsi in un'altra sostanza e il radio che lo riproduce si raggiunge grazie ai diversi tempi di dimezzamento delle due sostanze radioattive; il "padre" radio vive molto più a lungo (tempo di dimezzamento 1600 anni) del "figlio" radon (tempo di dimezzamento 4 giorni). In questo modo il radio non subisce variazioni significative della massa e l'insieme ha per tempi lunghi (equilibrio secolare) un'attività caratteristica di 37 miliardi di disintegrazioni al secondo (Fig. 83).

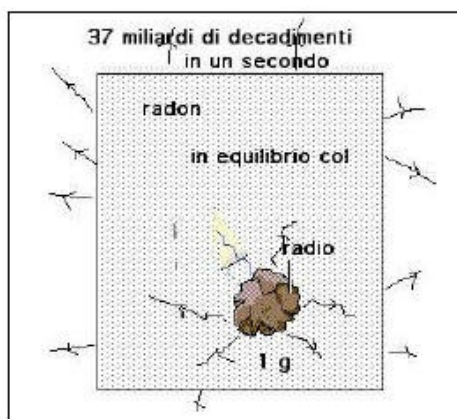


Fig.83

Oggi questa unità è sempre meno utilizzata anche se ancora diversi testi la richiamano. Nel Sistema Internazionale si preferisce invece svincolare la definizione dell'attività da un campione particolare e definire il Becquerel (simbolo Bq) come l'attività corrispondente ad una disintegrazione al secondo. Per cui $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ (1 curie è uguale a 37 miliardi di Becquerel). Poiché il Becquerel è un'unità piccola se confrontata con l'attività delle sostanze radioattive, in genere si utilizzano i suoi multipli, in particolare il terabecquerel (simbolo TBq) equivalente a mille miliardi di becquerel ($1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$).

5.4 ATTIVITÀ SPECIFICA

Per sostanze contenenti una percentuale molto bassa di radionuclidi naturali è preferibile misurare non tanto

l'attività quanto l'attività specifica, ovvero il numero di disintegrazioni al secondo che si hanno nell'unità di massa della sostanza, misurata in becquerel su chilogrammo (Bq/kg). Nella tabella che segue sono riportati alcuni valori tipici dovuti all'emissione di radon e toron in alcuni materiali:

Valori tipici dovuti all'emissione di radon e toron in alcuni materiali

	Attività specifica (Bq/kg)
Materiali impiegati in edilizia	Da 10 a 100
Tufo	Da 100 a 300
Residui di miniere di uranio	Oltre 1000

E' tra l'altro possibile nel caso di bassissime attività come quelle dovute a radionuclidi introdotti naturalmente nel corpo umano attraverso ingestione di cibi o di inalazione dell'aria utilizzare anche i sottomultipli del becquerel: mBq (millibecquerel) e μ Bq (microbecquerel); rispettivamente, millesima e milionesima parte dell'unità dell'attività nel Sistema Internazionale. Si vedano ad esempio le tabelle che seguono nelle quali vengono indicate le attività dovute ad alcuni radionuclidi introdotti mangiando un chilogrammo di un certo alimento o respirando un metro cubo di aria.

Tabella 5.5

Attività specifica di radionuclidi naturali nel cibo (mBq/kg)

	U 238 U 234	Th 230	Rn 226	Pb 210	Po 210	Th 232	Ra 228	Th 228	U 235
Derivati del latte	1	0,5	5,0	40	60	0,30	5,0	0,30	0,05
Carni	2	2	15	80	60	1	10	1	0,05
Derivati del grano	20	10	30	100	100	3	60	3	1
Verdure	20	20	50,0	30	30	15	40	1,50	1
Frutta	3	0,5	30	25	30	0,50	20	0,50	0,10
Pesce	30		100	200	2.000				
Acqua	1	0,1	0,5	10	5	0,05	0,5	0,05	0,04

Tabella 5.6

Attività specifica di radionuclidi naturali nell'aria (mBq/m³)

	U- 238 U 234	Th 230	Rn 226	Pb 210	Po 210	Th 232	Ra 228	Th 228	U 235
Aria	1	0,5	0,5	500	50	1	1	1	0,05

5.4.1 Dose assorbita e sua unità di misura

Precedentemente abbiamo ricordato che 1 grammo di radio in equilibrio col radon emette in un secondo 3,7 10¹⁰ particelle alfa (ciascuna di energia prossima a 5,6 MeV). Trasformando questi valori nelle unità del Sistema Internazionale **1** si ha che il sistema emette in un secondo un'energia complessiva di 0,033 joule (l'unità dell'energia nel Sistema Internazionale **2**). Se questa fosse trasferita ad un corpo di massa 1 kg, ad esempio aria o un altro materiale, la dose assorbita da questo materiale sarebbe pari al rapporto tra energia e massa; ovvero: D=0,033J/kg. All'unità joule su chilogrammo (J/kg o J kg⁻¹) è stato attribuito, nel Sistema Internazionale, il nome di gray (simbolo Gy). Per cui 1J/kg=1Gy. Poiché il valore dell'unità è molto grande, in radioprotezione normalmente vengono usati i sottomultipli dal solito significato: cGy (centigray), mGy (milligray) e μ Gy (microgray). Per riferimento si pensi che valori di qualche gray vengono impiegati in radioterapia per far assorbire una dose letale al focolaio tumorale. La vecchia unità di misura della dose assorbita è il rad³. Il suo uso non è ammesso nel Sistema Internazionale. Ricordiamo comunque le equivalenze: 1rad = 0,01 Gy 1 Gy = 100 rad.

1 Per passare da MeV a J (joule) bisogna utilizzare le seguenti equivalenze: 1 MeV = 1,6 10⁻¹⁹ J = 1,6 10⁻¹³ J. In un secondo l'energia complessiva risulta E=3,7 10¹⁰ 1,6 10⁻¹³ J = 3,7 10⁻³ J.

2 Per avere un'idea 100 joule (100 J) è l'energia associata ad esempio al funzionamento di una lampadina da 100 W in un secondo. Così come un corpo di massa di 1 kg che viaggia ad una velocità di 1 m/s ha un'energia di 0,5 J.

3 L'unità di misura della dose assorbita che precede il gray deriva dal sistema c(centimetro), g (grammo), s (secondo). L'energia in tale sistema si misura in erg; 1 erg corrisponde a 10^{-7} J. La dose unitaria assorbita nel sistema cgs viene definita come la radiazione di energia pari a 100 erg assorbita dalla massa di 1 grammo. Da cui $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg}/1 \text{ g} = 100 \cdot 10^{-7} \text{ J}/10^{-3} \text{ kg} = 10^{-2} \text{ Gy}$.

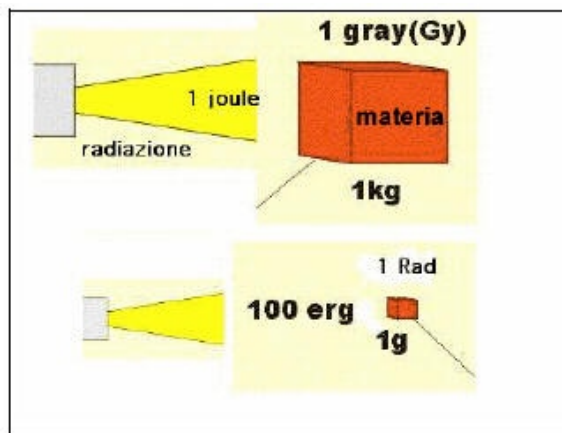


Fig.84

5.4.2 Kerma (in aria) e sua unità di misura

Nel caso in cui la radiazione ionizzante non sia composta da particelle cariche, per darle un indice di pericolosità, dato il grande potere penetrante, si preferisce sostituire all'energia della radiazione stessa, l'energia cinetica delle particelle cariche che si generano nel passaggio della radiazione nella materia. E poiché in inglese la frase: "energia cinetica rilasciata nel materiale" viene scritta nella forma: "kinetic energy released in material", la nuova grandezza viene chiamata kerma. Precisamente si definisce kerma la somma complessiva delle energie cinetiche delle particelle cariche liberate nella ionizzazione di un materiale attraversato da raggi x o gamma (o neutroni), su unità di massa del materiale in questione. Questa grandezza ha dunque la stessa unità di misura della dose assorbita, ossia il gray, pari a 1 joule su un chilogrammo. Inoltre si può definire il kerma in un punto (in un piccolo volume) del materiale, ossia per l'unità tendente a zero. Normalmente il materiale scelto come riferimento è l'aria e si misura ad esempio il kerma in aria della radiazione x o gamma.

5.4.3 Primi cenni alle grandezze di rilievo per l'interazione con gli organismi viventi

Se il "materiale" irradiato è il corpo umano, le precedenti grandezze non possono descrivere completamente la nocività della radiazione. Si introducono allora grandezze equivalenti e una nuova unità di misura chiamata sievert (simbolo Sv) equivalente numericamente al gray. Queste tengono conto della specificità dei tessuti. L'argomento è così importante che gli dedicheremo ampio spazio nei prossimi capitoli. Qui basti sottolineare che ancora si misura un'energia assorbita su unità di massa, ma l'energia viene modificata per un fattore che dipende dalla specificità della radiazione e dell'organo che l'assorbe. Per fare un solo esempio si guardi la tabella di conversione tra kerma in aria provocati dai raggi gamma naturali provenienti dai radionuclidi e la Dose efficace assorbita dalla popolazione.

Tabella 5.7

Coefficienti di conversione (Sv su Gy) tra kerma in aria e Dose efficace per i raggi gamma dovuti ai radionuclidi naturali Radionuclidi Adulti Ragazzi Bambini

Radionuclidi	Adulti	Ragazzi	Bambini
Potassio 40	0,74	0,81	0,95
Serie del Torio 232	0,72	0,81	0,92
Serie dell'uranio 238	0,69	0,78	0,91
Medie	0,72	0,80	0,93

Per comprendere la tabella precedente prendiamo come esempio il potassio 40. Se la radiazione gamma dovuta a

questo radionuclide porta in un anno alla misura di 1 mGy di kerma in aria, l'equivalente di dose efficace sarà per un adulto pari a 0,74 mSv e per un bambino piccolo uguale a 0,95 mSv. Come si vede la corrispondenza è prossima ad 1 e spesso le due grandezze si possono, in prima approssimazione, sostituire l'una all'altra. Per concludere si riportano le grandezze e le unità più importanti del Sistema Internazionale relative alla radioattività di cui abbiamo trattato.

Tabella 5.8

Grandezze e unità in radiometria

Grandezza	Unità	Simbolo unità	Espressione in termini di unità fondamentali
Attività (di un radionuclide)	Becquerel	Bq	s ⁻¹
Dose assorbita	Gray	Gy	m ² s ⁻²
Kerma (in aria)	Gray	Gy	m ² s ⁻²
Dose efficace	Sievert	Sv	m ² s ⁻²

Attività (di un

6. RIVELATORI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

6.1 CLASSIFICAZIONE

Il principio sul quale si basano tutti i rivelatori di radiazioni ionizzanti è il trasferimento di parte dell'energia della radiazione alla massa sensibile del rivelatore e la successiva conversione in una forma diversa di energia: elettrica, luminosa, chimica. Si possono distinguere i rivelatori in base alla sostanza sensibile: gas, cristalli, semiconduttori, emulsioni fotografiche; oppure classificarli secondo i fenomeni principali d'interazione: ionizzazione, luminescenza (scintillatori), termoluminescenza (dosimetri TL). Storicamente i primi strumenti per la misura della radioattività furono realizzati da Geiger e Müller; ancora oggi i rivelatori che portano il nome di questi due fisici sono molto importanti e diffusi.

6.2 SONDE DI GEIGER E MÜLLER

Lo schema costitutivo di un rivelatore di radiazioni è assai semplice (Fig.85).

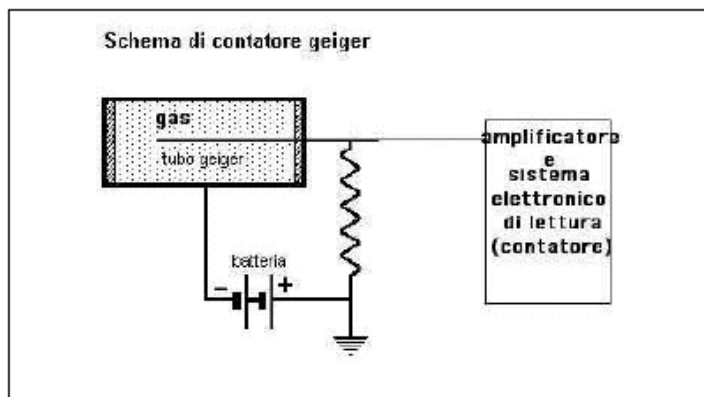


Fig.85 - Schema costitutivo di un rivelatore di radiazioni

Un gas (neon o argon con l'aggiunta di altre sostanze) a bassa pressione (un decimo di quella atmosferica) è racchiuso in un tubo con pareti in vetro e le estremità in metallo. Un filo metallico, isolato dal tubo si trova all'interno del recipiente a contatto col gas. Tra l'armatura metallica del tubo e il filo si stabilisce una differenza di potenziale sufficientemente elevata (diverse centinaia di volt¹). Se la radiazione ionizzante attraversa la finestra in vetro il gas diviene conduttore per cui nel circuito esterno si hanno impulsi di corrente corrispondenti alla ionizzazione del gas. Rinforzando il segnale con un opportuno amplificatore è possibile contare gli impulsi attraverso uno strumento digitale.

¹ Oggi normalmente i tubi G.M. lavorano con tensioni di 500 volt oppure 900 volt.

Esempi di tubi Geiger recenti di varie dimensioni e forme per la misura di radiazioni gamma sono rappresentati in figura 86 e 87.



Fig.86 - Esempi di tubi Geiger



Fig.87 - Sonde di Geiger-Müller di varie forme

Il materiale trasparente alla radiazione che contiene il gas deve essere estremamente sottile per poter far penetrare al suo interno la radiazione beta e quella alfa, inoltre, poiché la radiazione alfa può percorrere solo pochi centimetri in aria, la sonda viene messa praticamente a contatto con la sorgente radioattiva al fine di misurare quest'ultimo tipo di radiazioni. Le sonde più sensibili sono costituite da finestre con pareti di mica sottilissima (due milligrammi o meno per ogni centimetro quadrato di superficie). In figura 90 è riportata una sonda con il relativo connettore.



Fig.88 - Sonda GF 145

Talvolta all'interno dello stesso tubo in vetro è presente una finestra in mica (sensibile a radiazioni meno penetranti) protetta da coperchi metallici. In questo modo il tubo in vetro può essere sensibile alle sole radiazioni gamma, mentre il tubo con la finestra aperta di mica è adatto alla misura contemporanea della radiazione gamma e beta; il confronto delle due misure permette allora di discriminare tra le componenti beta e gamma della radiazione ionizzante.

6.3 CONTATORI (SCALER)

Il rivelatore G. M. di per sé è solo un sensore; per effettuare una misura questo deve essere collegato allo strumento vero e proprio. Il contatore è capace di fornire tensioni variabili per le diverse sonde, è dotato di un timer, e, nelle versioni più sofisticate, è capace di effettuare conteggi fino a milioni di impulsi al secondo rilevabili su una scala analogica o visualizzabili immediatamente come numero su un display digitale o un contatore numerico (Fig.89).



Fig.89 - Contatore

Sono ovviamente disponibili moltissimi modelli portabili che, oltre alla scala di conteggio degli impulsi al secondo (indicati con la sigla inglese cps – colpi per secondo-) o al minuto (cpm in inglese - colpi per minuto -) permettono, conosciute le caratteristiche delle sonde, la misura delle grandezze dosimetriche nell'unità di tempo (**ratei delle grandezze**). I contatori con scale diverse dal numero degli impulsi sono così chiamati misuratori di rateo (in inglese ratemeter) (Fig.90).



Fig.90 - Misuratore di rateo RA 141 BF

Gli strumenti per la misura delle radiazioni ionizzanti sono talvolta indicati con il termine **radiametri**. Tali strumenti sono costituiti da un contatore accoppiabile con diverse sonde (in genere uno per ogni tipo di radiazione), sia tubi di Geiger-Müller, ma anche scintillatori che utilizzano altri effetti fisici per rilevare l'interazione radiazione-materia. Esistono inoltre strumenti compatti privi di sonda esterna che hanno il sensore incorporato al loro interno. Nella figura 91 ne è riportato un esempio.



Fig.91 - Radiometro R54

APPROFONDIMENTO

Per intensità di dose o rateo di dose si intende la velocità di assorbimento della dose. Il computo della dose che si riceve in un certo tempo di esposizione ad un campo di radiazioni si effettua calcolando l'area racchiusa dalla curva che fornisce l'intensità di dose in funzione del tempo.

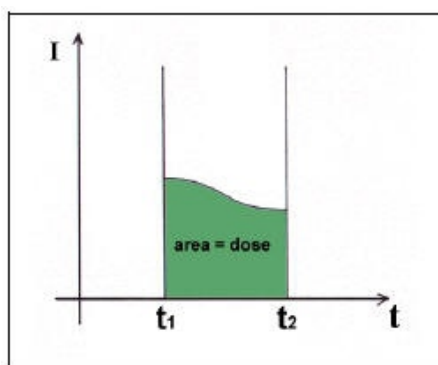


Fig.92

6.4 SCINTILLATORI

Il modello di atomo con un nucleo centrale e spazio vuoto intorno è associato ad un'esperienza realizzata da Geiger e Marsden nei primi anni del novecento (Fig.93).

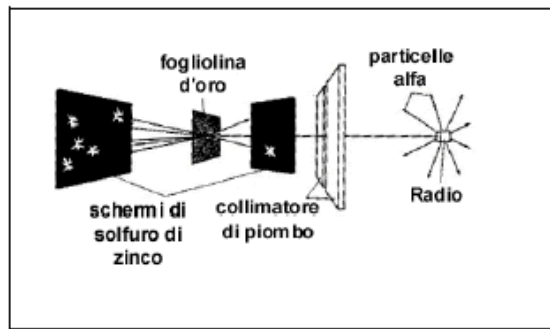


Fig.93 - Rappresentazione dell'esperienza realizzata da Geiger e Marsden

Particelle alfa emesse dal radio e collimate da una lastra di piombo con una fenditura venivano fatte incidere su una sottilissima lastra d'oro. Le posizioni finali raggiunte dalle particelle alfa deviate venivano visualizzate tramite piccolissime scintille (lampi di luce) che si formavano su lastre contenenti solfuro di zinco (ZnS) osservate in una camera oscura grazie ad un microscopio. Tali sostanze luminescenti sono i primi esempi di scintillatori e ancor oggi vengono impiegati come sostanze sensibili, anche se sono più comuni cristalli come lo ioduro di sodio con parti in tallio - NaI (Tl)-. Lo schema di funzionamento di un moderno sensore a scintillazione è indicato nella figura 94.

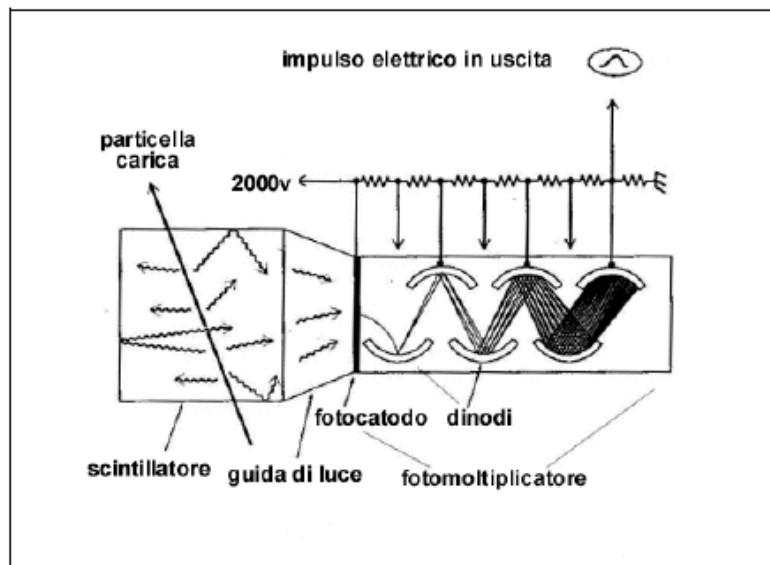


Fig.94 - Schema di funzionamento di un moderno tubo scintillatore

La cessione di energia al cristallo da parte di una radiazione provoca nello scintillatore un'emissione di luce. Questa luce, grazie a un fotomoltiplicatore, si trasforma, incidendo sul fotocatodo, in un impulso elettrico che viene amplificato da successivi dispositivi chiamati dinodi. Il fotomoltiplicatore è posto sotto tensione da un generatore esterno. Opportune sostanze poste di fronte alla finestra dello scintillatore possono filtrare l'energia della radiazione incidente. Un esempio di scintillatori per raggi x è rappresentato nella figura 95.

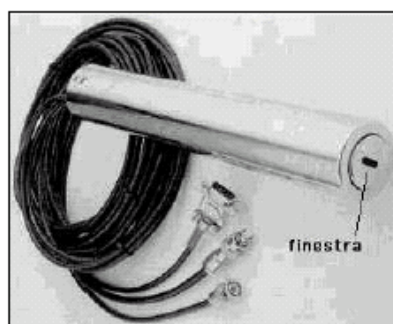


Fig.95 - Esempio di scintillatore per raggi x

Le sostanze attive degli scintillatori possono essere inorganiche come il cristallo NaI (ioduro di sodio); organiche (contenenti composti organici in un solvente solido plastico come ad esempio il plexiglas, e detti per questo scintillatori plastici). Tutti gli scintillatori hanno un rendimento notevolmente superiore a quello dei tubi G. M. per la misura della radiazione gamma.

6.5 SPETTROSCOPIA GAMMA: ANALIZZATORI MULTICANALE

Nel controllo della radioattività è spesso importante non solo valutare la presenza di una eventuale sorgente

radioattiva, ma anche individuare lo specifico radionuclide che è causa dell'irradiazione. Ciò è possibile misurando non solo il quantitativo di radiazioni complessivamente emesse dalla sorgente, ma anche le principali energie in gioco nell'interazione materia-radiazione, poiché queste permettono di discriminare tra i diversi radionuclidi. Si tratta di valutazioni complesse a causa della sovrapposizione di più effetti (Compton, fotoelettrico, coppie), caratteristici dell'interazione tra radiazione gamma e materia, e della presenza di altre condizioni di disturbo (fondo naturale, presenza di più radionuclidi). Quando la radiazione viene analizzata secondo le diverse energie che la compongono si parla di spettroscopia, in analogia allo studio della luce bianca con un prisma che porta alla rivelazione delle sue componenti colorate (Fig.96).

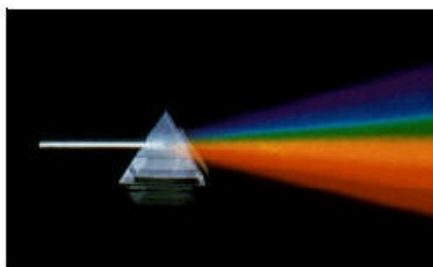


Fig.96

Visto che si può considerare la radiazione composta da particelle, immaginiamo la radiazione gamma come un insieme di fotoni ognuno di energia definita. L'obiettivo della spettroscopia gamma è allora contare quanti fotoni di un tipo e quanti di un altro la compongono, realizzando grafici in cui sull'asse orizzontale si riportano le energie dei fotoni e su quello verticale il numero assoluto (o relativo) di fotoni di quel gruppo. La realizzazione concreta di un simile obiettivo è difficile poiché anche una radiazione gamma caratterizzata da una sola energia, studiata con uno scintillatore genera tutta una serie di fotoni luminosi con energie variabili secondo curve del tipo di figura 97, dove il picco di energia si ha per l'effetto fotoelettrico in cui tutta l'energia del fotone gamma viene trasferita alla materia.

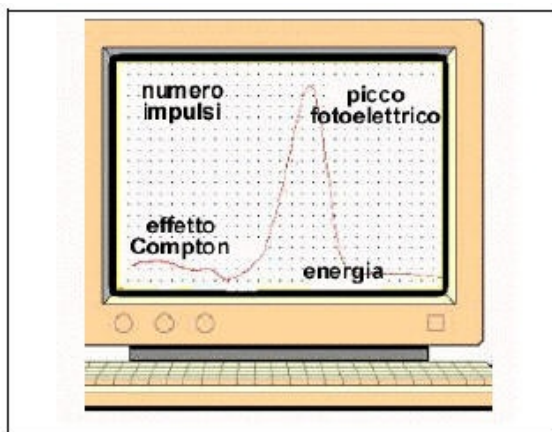


Fig.97

6.6 DOSIMETRI PERSONALI

Sono strumenti spesso di tipo passivo che misurano la dose di radiazione assorbita da chi li indossa. Ne esistono molti tipi: ci si limita qui a descrivere i dosimetri fotografici, quelli a camera di ionizzazione (stilodosimetri) e quelli a termoluminescenza.

6.6.1 Dosimetri fotografici

L'impressione di alcune lastre fotografiche, protette dalla luce, ma poste nelle vicinanze di una sorgente radioattiva, segnò l'inizio dell'indagine fisica del nucleo. Questo fenomeno è ancor oggi alla base di questo tipo di dosimetri personali, dalla forma di piastrine. La valutazione della dose ricevuta viene realizzata in appositi centri che misurano l'esposizione subita sulla base dell'annerimento della pellicola fotografica contenuta nella piastrina dello strumento. Oggi questo tipo di dosimetri è stato in larga parte soppiantato dai dosimetri a termoluminescenza di cui tratteremo tra breve.

6.6.2 Dosimetri a camera di ionizzazione



Fig.98

Il dosimetro a lettura diretta di figura 98 è uno strumento tascabile costituito da una piccolissima camera a ionizzazione sensibile alla radiazione gamma; un elettrometro per misurare la carica elettrica con fibra in quarzo mobile e un microscopio per leggere l'ombra proiettata dalla fibra su una scala graduata. L'elettrometro incorpora due elettrodi, uno dei quali mobile. Prima dell'uso lo strumento va azzerato (gli elettrodi vengono separati) con una predeterminata differenza di potenziale esterna fornita da un caricatore a cui deve essere collegato il dosimetro. Appena lo strumento è esposto alla radiazione, si verifica la ionizzazione all'interno della camera che fa diminuire, in proporzione all'esposizione, le cariche sugli elettrodi. La deflessione dell'elettrodo mobile è proiettata, da una sorgente di luce, attraverso un obiettivo sulla scala graduata e può essere letta attraverso l'oculare (Fig.99).

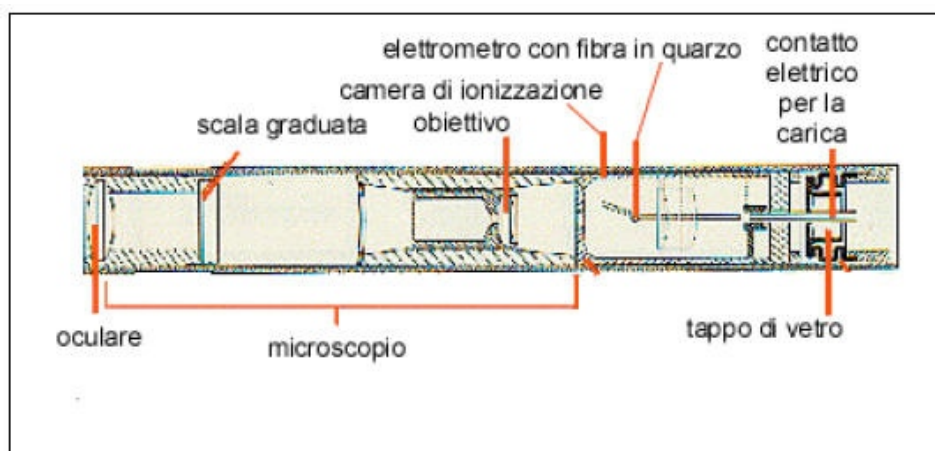


Fig.99 - Schema di funzionamento del dosimetro a lettura diretta

Per utilizzare lo strumento il lavoratore inizialmente lo carica, lo fissa agli indumenti esterni con l'apposita pinza ed infine effettua la lettura diretta puntandolo verso una sorgente luminosa (Fig.100).



Fig.100 - Utilizzo dello stilodosimetro

6.6.3 Dosimetri a termoluminescenza

Oggi la maggior parte dei dosimetri personali è basata sul fenomeno della termoluminescenza. I vantaggi di questi dosimetri sono molteplici. Pochi milligrammi di cristalli quali il fluoruro di litio con l'aggiunta di atomi di altre sostanze 1 formano la sostanza sensibile alle radiazioni ionizzanti e possono essere facilmente disposti in un apposito contenitore a forma di scheda o bracciale di ridotte dimensioni. Inoltre trattando opportunamente i cristalli, le misure delle dosi assorbite possono andare da valori pari a un centomillesimo di gray fino a misure, non certo riferite a dosi personali, di diecimila gray. Le variazioni subite dal cristallo a causa delle radiazioni persistono nel tempo e possono essere valutate in appositi centri con grande precisione e affidabilità con strumentazione standard. Inoltre è possibile dopo la realizzazione della misura reimpiegare lo stesso dosimetro.



Fig.101 - Dosimetro a termoluminescenza

1 L'inserimento delle impurità tipo il magnesio avviene attraverso un procedimento chiamato tecnicamente drogaggio. Un altro cristallo molto utilizzato è la fluorite ossia il fluoruro di calcio (CaF_2).

APPROFONDIMENTO

Vediamo in dettaglio il fenomeno fisico della termoluminescenza. Quando un materiale (la cui struttura è un reticolo cristallino) è esposto alla radiazione ionizzante, una redistribuzione delle cariche elettriche ha luogo all'interno del cristallo. Molti degli spostamenti di carica svaniscono in un breve intervallo di tempo dopo l'irradiazione, una piccola frazione, a causa delle imperfezioni reticolari createsi, permangono. Alcune cariche sono come bloccate in alcune trappole e il cristallo mantiene memoria della radiazione alla quale è stato esposto. Il surplus di energia di queste cariche che hanno raggiunto livelli energetici non accessibili in condizioni normali può essere rilasciato riscaldando il materiale. Quando ciò avviene il sistema emette luce (diviene luminescente) (Fig.102). Ripetendo lo stesso processo dopo il primo riscaldamento il materiale non riemette luce perché le cariche hanno ormai raggiunto la vecchia posizione di equilibrio.

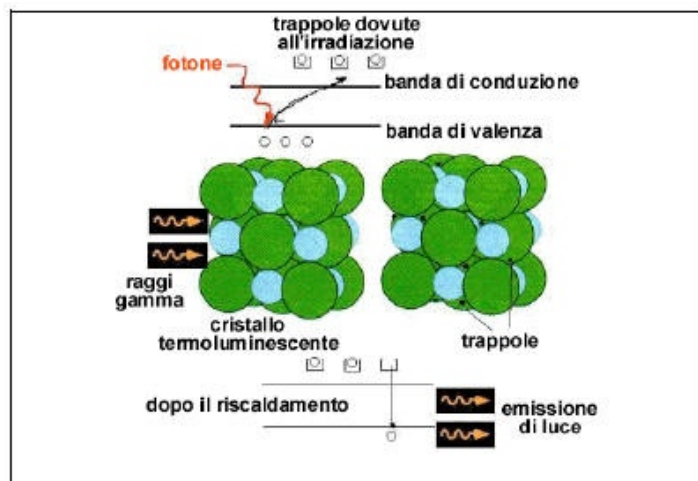


Fig.102

Riscaldando gradualmente il materiale irradiato si nota inoltre che esso presenta uno o più picchi caratteristici di emissione di luce a determinate temperature, nel senso che l'intensità della luce emessa è maggiore per quelle temperature. Inoltre la luminescenza complessiva del materiale dipende dalla dose assorbita (Fig.103).

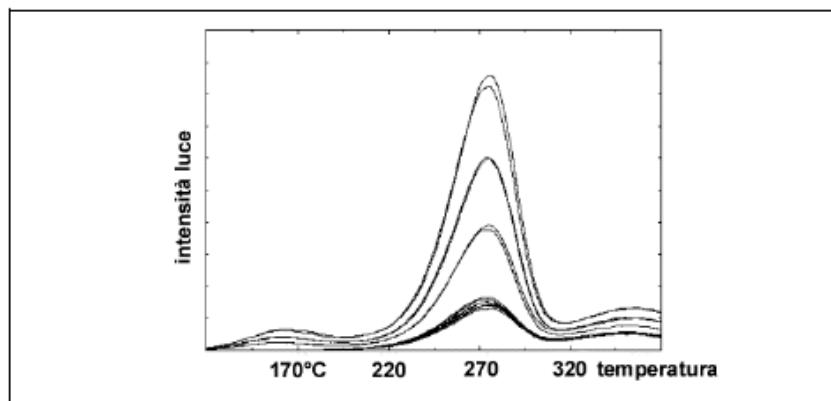


Fig.103 - Curva caratteristica di un cristallo di calcite che mostra la crescita dell'intensità dell'emissione di luce all'aumentare della temperatura. Le diverse curve mostrano l'andamento per dosi crescenti di radiazione assorbita

Ciò permette di fatto una misura della dose riscaldando pochi milligrammi del materiale e facendo incidere la luce

emessa per termoluminescenza su un fotomoltiplicatore collegato ad un contatore (Fig.104).

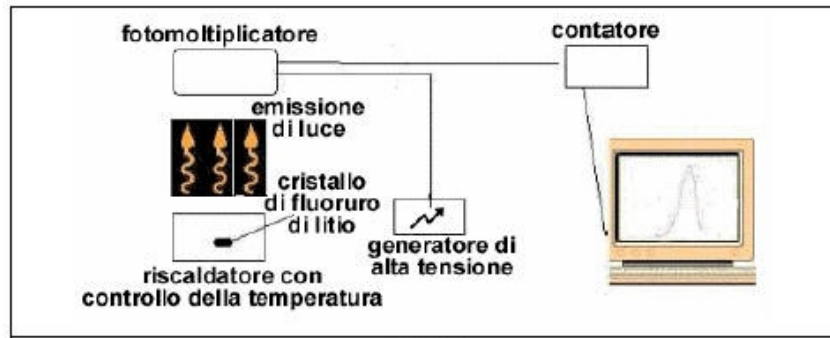


Fig.104

Per concludere si può ricordare che con la termoluminescenza si possono ottenere datazioni precise di ceramiche antiche.

7. EFFETTI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI SUGLI ESSERI VIVENTI

7.1 EFFETTI DETERMINISTICI E PROBABILISTICI

La penetrazione di radiazione ionizzante all'interno di un organismo vivente produce in un tempo infinitesimo una serie di elettroni e ioni positivi che, a loro volta, sempre in un tempo brevissimo (**un decimo di nanosecondo**¹), danno luogo a reazioni secondarie al termine delle quali si hanno **specie molecolari chimicamente molto reattive** e potenzialmente pericolose. L'azione chimica di queste ultime sulle (macro)molecole della vita può portare alla morte delle cellule o ad alterazioni del **DNA**. Inizia in questo secondo caso una modificazione biologica che può durare anche molti anni a seconda dell'intensità della radiazione, del tipo di radiazione e dei tessuti interessati. Gli effetti delle radiazioni sugli esseri viventi possono essere di due tipi: **deterministici** e **probabilistici**. I primi, detti anche **non stocastici**, seguono ad irraggiamenti acuti, superiori cioè a determinate soglie di dose (effetti immediati e a soglia). In questo caso esiste un nesso diretto tra l'effetto (danno biologico) subito dal singolo individuo e la causa (dose assorbita) che lo ha prodotto. Il secondo tipo di effetti, di natura stocastica, possono aver luogo anche in seguito all'assorbimento di dosi modeste. In questo secondo caso per la **casualità** intrinseca del percorso della radiazione, dei prodotti delle reazioni chimiche e della risposta dell'organismo, il danno biologico dovuto alla modifica del DNA può essere valutato solo in termini **probabilistici**. In altre parole si può stimare ad esempio la possibilità di avere un certo numero di casi di cancro su una popolazione numerosa o su un elevato numero di lavoratori esposti alla radiazione.

7.2 EFFETTI SULLE CELLULE

Sono state effettuate molte ricerche che riproducono su scala microscopica gli effetti di una "bomba nucleare". Un insieme di cellule uguali di mammifero costituisce la popolazione sotto osservazione (il bersaglio) e la bomba è costituita da dosi elevate di radiazione ionizzante (raggi x o γ) oppure neutroni. Variando la dose si può studiare quanti individui (cellule) della popolazione sopravvivono alla radiazione.

¹Un nanosecondo (1ns) è pari a un milionesimo di secondo. Il tutto può essere scritto nella forma decimale 0,000000000001 s; oppure nella forma di potenza 10^{-13} s.

La distinzione delle cellule in soli due gruppi (vive o morte) avviene considerando come morte non solo le cellule la cui struttura viene distrutta (evento raro), ma anche quelle incapaci di riprodursi. Si ottengono così curve del tipo rappresentato in figura 105.

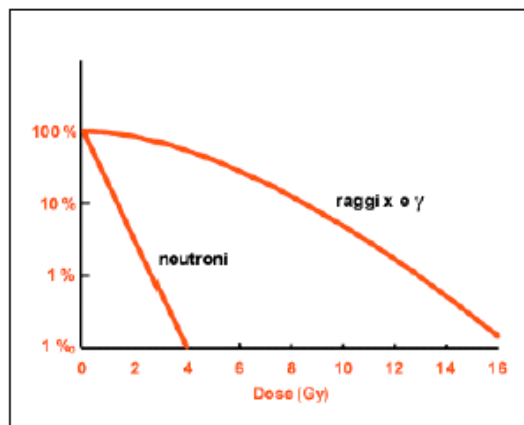


Fig.105

In tali grafici ad una dose zero corrisponde il 100% della popolazione (ancora la bomba non è stata attivata) e via via che la **dose assorbita** (misurata in **gray** simbolo Gy) aumenta, la popolazione si riduce a fattori percentuali

estremamente bassi. Con una capacità distruttiva notevolmente superiore per i neutroni rispetto ai raggi x e gamma.

7.3 DANNI AL DNA E MECCANISMI DI RIPARAZIONE

Anche se tutte le strutture delle cellule possono subire profonde alterazioni a causa della radiazione ionizzante, il principale danno che le radiazioni inducono sull'uomo riguarda il DNA. La molecola principale della vita, depositaria delle informazioni genetiche nelle cellule e capace di duplicarsi, è costituita da due catene a forma di doppia elica (vedi figura a fianco) collegate da coppie di molecole complesse (basi) che costituiscono una sorta di ponte tra le due eliche (il legame tra le basi è dovuto ad atomi di idrogeno). Fig.106

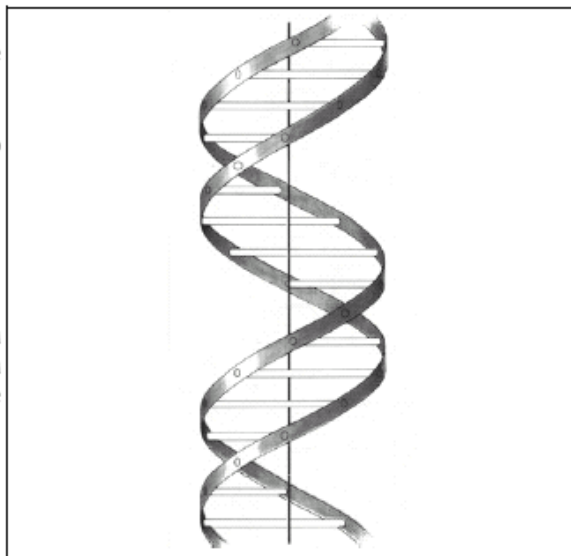


Fig.106

APPROFONDIMENTO

Poiché l'acqua rappresenta il principale costituente di un organismo, la radiazione con alta probabilità ionizza questa sostanza formando un elettrone ed una molecola caricata positivamente (senza un elettrone). In seguito l'elettrone si unisce ad una nuova molecola d'acqua trasformandola in una molecola negativa. Le molecole così formate, sia positive che negative, sono instabili e si trasformano in altri ioni (H^+ , OH^-), molecole (OH) e atomi liberi come l'idrogeno (H); i quali, a loro volta, come è facile intuire, possono interagire con la molecola di DNA. I principali tipi di danno biologico che si verificano sono la rottura dei legami di una catena del DNA (o di entrambe), la creazione di nuovi ponti di collegamento, la distruzione di parti della molecola. L'eventualità di un danno al DNA è un'evenienza abbastanza comune e può dipendere da una molteplicità di eventi fisici e chimici, ma le cellule sia individualmente che come popolazione hanno la capacità di sviluppare meccanismi di riparazione. Nel caso di rottura di una catena di DNA, la riparazione della singola cellula può avere successo, ma può avvenire che la sostituzione del DNA alterato comporti un errore che dia luogo a modificazioni genetiche (Fig.107).

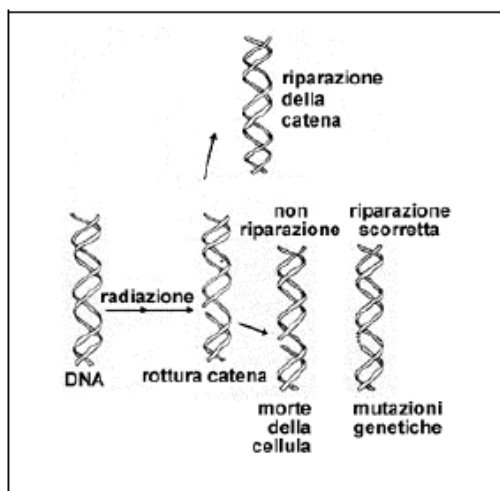


Fig.107

Pur essendo certi che al di sopra di una certa soglia di radiazione (diciamo 0,2 gray) si possano produrre danni al DNA, non è vero l'inverso; ossia per quanto piccola sia la dose di radiazione assorbita, questa può comunque produrre un danno. Infine va ricordata la possibilità, anche nel caso di dosi elevate, di rigenerazione di un intero tessuto, grazie alla proprietà delle cellule di riprodursi (Fig.108), nel caso in cui il numero delle cellule del tessuto che sopravvive alla radiazione sia sufficientemente grande.

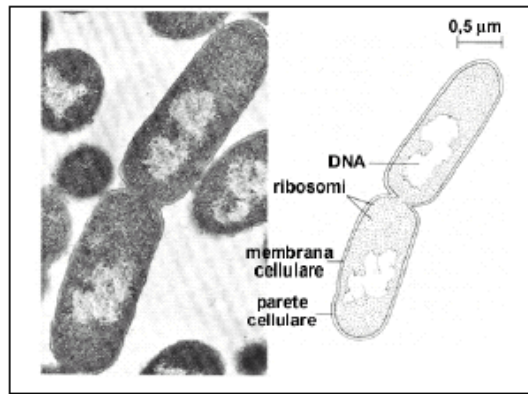


Fig.108 – Duplicazione della cellula di un batterio

7.4 TRASFERIMENTO LINEARE DI ENERGIA

Finora l'unica grandezza utilizzata per descrivere gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti è stata la dose assorbita (un'energia su unità di massa), ma il danno biologico non dipende solo dalla dose. Importanza hanno: il tipo di radiazione, i tessuti interessati e la modalità di scambio dell'energia tra la radiazione e le molecole dell'organismo. In particolare la particella (la radiazione) ionizzante trasferisce una certa energia **1**, per collisione o per altri tipi di scambio, lungo un tratto, considerato, rettilineo all'interno della cellula **2**. Più breve sarà il percorso in cui le particelle scambiano energia, maggiore sarà il danno. Il **trasferimento lineare di energia** viene indicato con il simbolo L (una densità di energia su unità di lunghezza **3**), più alto è il suo valore, maggiore è la probabilità di provocare la morte della cellula. Bisognerà dunque tener conto di questa diversa capacità della radiazione ionizzante, a parità di dose assorbita, di produrre effetti nocivi (Fig.109).

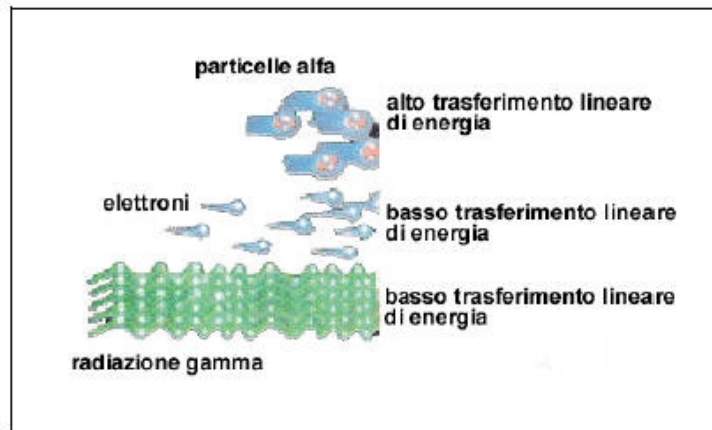


Fig.109

1 L'energia di una particella oltre che nell'unità del Sistema Internazionale joule (simbolo J), può essere misurata, come è stato già ricordato, in elettronvolt o nei suoi multipli kiloelettronvolt (1keV=mille elettronvolt) e megaelettronvolt (1 MeV=un milione di elettronvolt). Definendo questa come l'energia che possiede un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di un volt.

2 L'unità di misura del tratto lineare può essere fissata pari all'ordine delle dimensioni della cellula, ovvero un milionesimo di metro, unità indicata in simboli come 1mm (1 micrometro=10⁻⁶m).

3 L'unità di misura può essere il keV/mm. Talvolta il termine tecnico associato al trasferimento lineare di energia è LET (dalle iniziali delle parole inglesi Linear Energy Transfer). Si parla così di radiazioni a basso LET o di radiazioni ad elevato LET.

7.5 FATTORE DI QUALITÀ PER LA RADIAZIONE

Si può misurare tale qualità negativa valutando il trasferimento lineare di energia all'interno di una sostanza di riferimento che è l'acqua (il principale composto degli organismi), ottenendo la tabella che segue.

Tabella 7.1 Fattore di qualità per la radiazione

Trasferimento lineare dell'energia nell'acqua (keV/μm)	Fattore di qualità
<3,5	1
7	2
23	5
53	10
>175	20

E' possibile parimenti ottenere grafici come quello che segue.

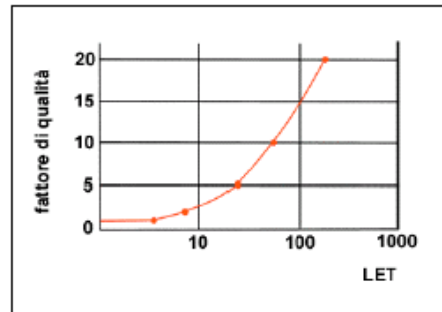


Fig.110

Prendendo in considerazione la precedente tabella, se la dose assorbita dall'acqua è unitaria per un trasferimento lineare di energia (**LET**) estremamente basso (minore di 3,5), diviene equivalente al doppio per un trasferimento lineare pari a 7; cresce fino a cinque volte per un trasferimento uguale a 23. In luogo del fattore di qualità sopra definito, il D.Lgs. 241/00 ha introdotto il fattore di peso della radiazione (**WR**) che ha un significato simile alla precedente grandezza. In altre parole, la **dose assorbita** (simbolo D) va sostituita con una **dose equivalente** (simbolo H) ottenuta moltiplicando D per il **fattore di qualità Q** (o **WR**) delle radiazioni, un numero senza unità di misura che rende conto della pericolosità della radiazione.

In simboli 1: $H = D Q$

Valutare il fattore di qualità per un insieme di radiazioni che penetrano all'interno di un organismo è però estremamente difficile, poiché esso dipende dalle condizioni di esposizione, dal tipo di radiazione e dalla sua energia. In caso di esposizione omogenea del corpo intero si utilizzano per rilevare la maggiore nocività delle diverse radiazioni i valori medi riassunti nella tabella che segue.

Tabella 7.2

Esempi di valori del fattore di qualità

Particella o radiazione	Valori del fattore di qualità
Raggi x, raggi γ, elettroni	1
Neutroni	10
Particelle α	20

Dunque, lo ribadiamo, a parità di dose assorbita i neutroni producono danni notevolmente superiori rispetto ai raggi x o agli elettroni.

1 Più precisamente, nel caso di più tipi di radiazioni contemporanei: $H = \sum DR \cdot WR$, dove DR è la dose dovuta alla Resima radiazione e WR il relativo peso.

APPROFONDIMENTO

Si potrebbe pensare che aumentando l'energia delle particelle (costituenti la radiazione ionizzante) aumenti il fattore di qualità; in realtà al di sopra di una certa energia l'effetto, per molte particelle, è opposto perché queste interagiscono di meno con l'organismo attraversato (il LET diminuisce). Ciò è sottolineato dal grafico indicante il fattore di qualità in funzione dell'energia delle particelle:

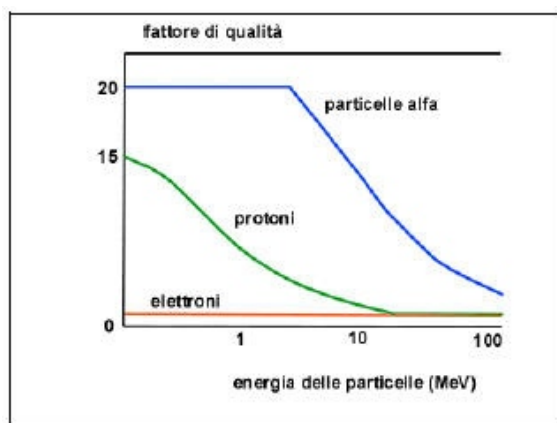


Fig.111

7.6 EFFETTI SUI TESSUTI (FATTORE DI PONDERAZIONE)

Le cellule dei tessuti non hanno tutte la stessa capacità di rinnovarsi dividendosi permanentemente. Organi quali il fegato e il rene, le cui cellule si rinnovano più lentamente, subiscono danni dalle radiazioni solo per dosi assorbite elevate; mentre il midollo osseo, l'intestino e gli organi di riproduzione sono formati da tessuti a maggior rischio radiazioni. Per questo motivo nel valutare il danno biologico i diversi organi o tessuti vengono divisi in vari gruppi, attribuendo a ciascun gruppo un numero decimale (indicato con **w_T**) chiamato **fattore di ponderazione** (o peso). Il fattore di ponderazione è legato alle dimensioni del tessuto, ma soprattutto **misura** la sua **vulnerabilità** (in termini di effetti probabilistici), a parità di dosi equivalente. La somma dei fattori w_T di tutto il corpo è uguale all'unità, come si rileva dai valori riportati nella normativa italiana:

Tabella 7.3

Fattore di ponderazione su alcuni tessuti

Organo o tessuto	Fattore di ponderazione w _T
Gonadi	0,25
Mammella	0,15
Midollo osseo rosso	0,12
Polmone	0,12
Tiroide	0,03
Ossa (superfici ossee)	0,03
Rimanenti organi o tessuti	0,30
Totale	1

Nel prossimo capitolo vedremo un esempio dell'uso di questi valori.

7.7 EFFETTI SUL CORPO UMANO

Gli studi sistematici degli effetti della radioattività sull'uomo hanno avuto inizio subito dopo i bombardamenti atomici americani in Giappone. Da allora, con la presa di coscienza dei pericoli delle radiazioni ionizzanti, le ricerche hanno preso come riferimento particolari gruppi di lavoratori esposti: minatori impegnati nell'estrazione di uranio, verniciatori che utilizzavano sostanze radioattive per i quadranti luminosi degli orologi, operatori in radiodiagnostica. Fino a giungere ai giorni nostri in cui vengono monitorati lavoratori sottoposti a piccoli aumenti della radiazione rispetto al fondo naturale come i piloti di aerei intercontinentali. Alla definitiva affermazione di questa diversa percezione generale dei rischi connessi alle radiazioni ha contribuito sicuramente il tragico incidente della centrale di Chernobyl nel quale migliaia di persone sono state irradiate. Importante è distinguere la radioattività che opera esternamente all'organismo (esposizione esterna) e quella che attraverso l'ingestione o la respirazione ha raggiunto organi interni (esposizione interna).

7.7.1 Esposizione esterna o interna

L'irradiazione parziale o totale di un individuo è detta **esposizione**. Si parla di esposizione **esterna** quando l'irradiazione è dovuta a sorgenti poste all'esterno dell'organismo e di esposizione **interna** quando le sorgenti sono all'interno dell'organismo. Nel caso di **esposizione esterna** la radiazione alfa non è molto pericolosa perché non riesce a raggiungere lo strato attivo dove avviene la moltiplicazione cellulare dell'epidermide, fermandosi nel primo strato della pelle su cellule morte (Fig.112). Le radiazioni beta (elettroni), se sufficientemente energetiche, possono invece penetrare fino alle cellule attive della pelle (superando lo spessore di 70 micrometri costituito da cellule morte). Con radiazioni x e gamma tutto il corpo viene interessato dalla ionizzazione.

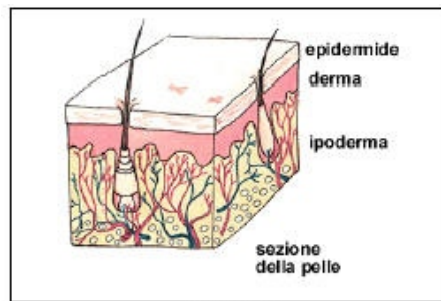


Fig.112

L'**esposizione interna** cambia completamente queste considerazioni. Le possibili vie seguite dai **radionuclidi** per localizzarsi all'interno del corpo possono essere: la respirazione di aerosol di particelle radioattive, l'alimentazione con prodotti contaminati (latte, verdure, ecc.), le ferite cutanee, l'assorbimento attraverso la pelle. In questi casi alcuni isotopi risultano estremamente pericolosi come lo iodio radioattivo che si concentra nella tiroide o lo stronzio radioattivo che si fissa nelle ossa. Alcuni isotopi possono permanere nell'individuo per la sua intera vita continuando ad emettere radiazioni ionizzanti. In questo caso la radiazione più pericolosa è la radiazione alfa che ha un fattore di qualità più elevato.

7.7.2 Effetti somatici deterministici

Come è stato già detto, i tessuti e gli organi, specie quelli le cui cellule si riproducono velocemente, sottoposti ad elevate dosi di radiazione subiscono in tempi rapidi dei danni che ne compromettono la funzionalità. Nella tabella sono riportate le dosi e alcuni degli effetti più rilevanti per i tessuti a maggior rischio per esposizione alle radiazioni γ .

Tabella 7.4

Esempi di dosi ed effetti più rilevanti per i tessuti a maggior rischio

Tessuto	Dose (gray)	Effetto
Testicoli	0,15	Sterilità temporanea
Testicoli	3,5 – 6	Sterilità permanente
Ovaio	2,5 – 6	Sterilità
Cristallino	0,5 – 2	Opacità visibili
Cristallino	5	Cataratta
Midollo osseo	0,5	Ridotta produzione di globuli bianchi

Nel caso di irradiazione omogenea del corpo (**esposizione globale**) a dosi ancora superiori si rischia la morte con effetti che possono essere riassunti come segue. Se la dose è compresa tra 2 e 10 gray, già dopo alcune ore dall'irradiazione, iniziano le prime manifestazioni di nausea e vomito, a cui seguono nel tempo infezioni ed emorragie, perdita dei peli e dei capelli. Entro un mese la metà dei soggetti esposti muore per una dose di 4 gray. Con dosi tra i 10 e i 20 gray dopo mezz'ora si hanno sintomi di diarrea e febbre, dopo pochi giorni la quasi totalità delle persone esposte muore per lesioni a carico della mucosa intestinale e collasso circolatorio. Infine con dosi ancora maggiori si hanno convulsioni, tremori, sonnolenze ed entro due giorni sopraggiunge la morte per difficoltà respiratorie ed edema cerebrale.

7.7.3 Effetti somatici tardivi ed effetti ereditari

Proprio per la natura casuale del danno non è possibile stabilire una dose minima al di sotto della quale la radiazione risulta innocua. Si valuta comunque che se diecimila persone fossero irradiate ciascuna con dosi dell'ordine della decina di mSv, una sola di queste entro trent'anni dall'esposizione potrebbe morire di un tumore o di una leucemia a causa dell'irradiazione. Basse dosi sono tuttavia sufficienti per provocare ad un feto danni che si manifesterebbero molto tempo dopo l'esposizione. Una dose di 0,5 gray può risultare letale per l'embrione. Inoltre si ribadisce che irradiazioni di qualsivoglia intensità possono comunque portare alla modificazione dei cromosomi (nella struttura e nel loro numero) o a mutazioni geniche riscontrabili nelle generazioni successive.

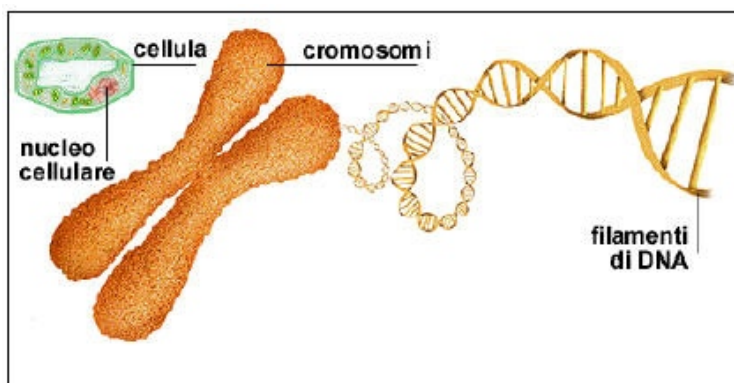


Fig. 113 - Rappresentazione della struttura del nucleo della cellula

10. LA RADIOATTIVITÀ E IL CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO

10.1 I DECRETI 230 E 241 E IL C. N. VV. F.

La **legge 13 maggio 1961, n. 469**, all'art.1 attribuisce al Ministero dell'interno i "servizi tecnici per la tutela dell'incolumità delle persone e la preservazione dei beni anche dai pericoli derivanti dall'impiego dell'energia nucleare". Il C.N.VV.F. interviene quindi ogniqualvolta si presenti un pericolo per i cittadini e/o i loro beni a causa di radiazioni comunque originate. La **legge 24 febbraio 1992, n. 225**, concernente l'istituzione del Servizio nazionale della protezione civile, stabilisce che il C.N.VV.F. è componente fondamentale della protezione civile, organismo preposto alla tutela dell'integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente dal pericolo di danni derivanti anche da catastrofi o da altri eventi calamitosi. Data questa premessa è evidente che la recente normativa sulla radioattività (il D.Lgs. 230/95 e il D.Lgs. 241/00) ribadisca il ruolo di protezione, di controllo e d'intervento che il Corpo deve svolgere in situazioni di pericolo dovuto alle radiazioni ionizzanti. E' così previsto che il Comando provinciale dei vigili del fuoco sia informato:

a) delle sorgenti di radiazioni (comprese le macchine radiogene) presenti nel territorio e dei mezzi di protezione posti in atto da chi le detiene;

b) dello smarrimento o perdita di sostanze radioattive o di apparecchi contenenti dette materie;

c) del deposito temporaneo ed occasionale di materie fissili speciali o di combustibili nucleari. I predetti decreti inoltre attribuiscono al Corpo nazionale dei vigili del fuoco competenze nell'ambito delle istruttorie per il rilascio delle autorizzazioni relativamente all'impiego, alla detenzione e al trasporto delle sostanze radioattive, nonché all'esercizio degli impianti nucleari. Il Comando ha così una mappa dettagliata di tutte le possibili sorgenti (ordinarie e non) di radioattività. Esso inoltre partecipa all'elaborazione del piano di emergenza degli impianti nucleari d'intesa con un collegio di tecnici. Nel seguito faremo un cenno ad uno di questi piani. Come pure faremo cenno al "piano nazionale delle misure protettive contro le emergenze radiologiche", emanato dalla Presidenza del Consiglio dei ministri - Dipartimento della protezione civile, volto a fronteggiare incidenti in impianti al di fuori del territorio nazionale, in navi a propulsione nucleare, nel trasporto di materiali radioattivi ed incidenti non correlabili ad un'area specifica (ad esempio, caduta satellite). Nelle situazioni eccezionali, in eventi che possono comportare rilevante contaminazione dell'aria, dell'acqua, del suolo o di altre matrici ambientali in zone esterne del perimetro di uno stabilimento, i vigili del fuoco sono immediatamente avvertiti e il Comandante provinciale attiva i primi interventi di soccorso tecnico urgente previsti nel piano di emergenza.

Il Corpo svolge inoltre un ruolo fondamentale nella gestione dell'emergenza radiologica con la designazione di uno dei membri del centro di coordinamento nazionale CEVAD (composto da 4 esperti di radioprotezione e 4 supplenti) che ha il compito di elaborare e valutare i dati dei livelli di radioattività nell'ambiente. La rete di allarme gestita dal Ministero dell'interno ai sensi della citata legge 469/61 concorre autonomamente al sistema di reti nazionali per il rilevamento della ricaduta radioattiva. L'insieme delle principali attività previste per i VV.F. dai decreti 230 e 241 è riassunto nello schema di figura 129. Nelle pagine che seguono saranno descritti alcuni degli interventi possibili del Corpo in relazione alla radioattività (ricerca di sorgente radioattiva, interventi per contenitori danneggiati nel trasporto, sorgente esposta, incendio in prossimità di sostanze radioattive, ecc.). Si parlerà inoltre di due strutture nazionali importanti e specifiche dei vigili del fuoco impegnate, rispettivamente, nel rilevamento di una eventuale ricaduta radioattiva e nel servizio dosimetrico. Prima ancora è bene richiamare alcune grandezze caratteristiche delle radiazioni ionizzanti.



Fig.129

10.2 RATEO O INTENSITÀ DELLE GRANDEZZE DOSIMETRICHE

Il limite di 20 millisievert (20 mSv) di dose equivalente all'anno per un lavoratore esposto di categoria A la cui attività si svolge in una zona controllata, porta (considerando approssimativamente 2000 le ore lavorative annue) ad una **dose per unità di tempo** pari a:

$H/t = 20 \text{ mSv}/2000\text{h} = 1 \text{ mSv}/100 \text{ h} = 10 \text{ mSv}/\text{h}$ (dieci milionesimi di sievert all'ora). Ovvero per non raggiungere il limite massimo di equivalente di dose, un lavoratore non dovrebbe essere esposto in media ad un equivalente di dose di dieci milionesimi di sievert in un'ora. Il rapporto tra dose e tempo di esposizione è chiamato **rateo (o intensità) di dose**; esso rappresenta la grandezza che realmente viene misurata dagli intensimetri tarati dotati di apposite sonde. Anche un valore dieci volte inferiore a quello indicato sopra indica con elevata probabilità la presenza di radiazioni ionizzanti diverse da quelle naturali e quindi la vicinanza di una sorgente radioattiva. Infatti, considerando che in Italia la dose annua per il fondo naturale è circa 1mSv, il rateo di **equivalente di dose del fondo naturale** può essere valutato nell'ordine di $1\text{mSv}/(365 \cdot 24\text{h}) \sim 0,1 \text{ mSv}/\text{h}$.

Tabella 10.1

Valori di rateo che si avrebbero in prossimità di piccole sorgenti, nel caso in cui non fossero schermate

	Sorgente di radiazioni γ : cobalto 56 Attività: 37 MBq	Sorgente di radiazioni γ : cobalto 60 Attività: 37 MBq	Sorgente di radiazioni γ : americio 241-berillio Attività: 37 GBq	Sorgente di neutroni: americio 241-berillio ² Attività: 37 GBq
Distanza	Rateo equivalente di dose per i raggi γ	Rateo equivalente di dose per i raggi γ	Rateo equivalente di dose per i raggi γ	Rateo equivalente di dose per i neutroni
(m)	($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	($\mu\text{Sv}/\text{h}$)
0,1	1.620	1.210	2.100	2.200
0,2	400	300	500	550
0,5	60	50	80	88
1	16	12	20	22
2	4	3	5	5,5

Confrontando i valori alla distanza di un metro e due metri si vede immediatamente che raddoppiando la distanza il rateo di dose diviene un quarto del valore precedente. Così, se a un metro il rateo (o intensità) della sorgente Co60 è 12mSv/h a due metri esso risulta quattro volte più piccolo: 3mSv/h. Si possono generalizzare le precedenti affermazioni per una sorgente molto piccola (come dimensioni) e scrivere che H/t è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente (vedi cap.11).

1 In realtà il valore del fondo è superiore e può giungere anche a 3 mSv all'anno. Il valore misurabile del rateo risulta quindi compreso tra 0,15 mSv/h e 0,3 mSv/h.

2 L'americio 241 in presenza di berillio oltre ad emettere radiazioni γ diventa una sorgente di neutroni.

Nella tabella 10.2 sono riepilogate le grandezze di riferimento impiegate attualmente per le radiazioni ionizzanti.

Tabella 10.2

Grandezze di riferimento impiegate per le radiazioni ionizzanti

Grandezza	Nome unità	Simbolo unità
Equivalente di dose	sievert	Sv
Rateo ¹ di equivalente di dose	sievert al secondo	Sv s ⁻¹
Kerma in aria	gray	Gy
Rateo di kerma in aria	gray al secondo	Gy s ⁻¹
Esposizione di ionizzazione	coulomb al chilogrammo	C kg ⁻¹
Rateo di esposizione	coulomb al chilogrammo e secondo	C kg ⁻¹ s ⁻¹

Come si nota tra le unità di misura delle grandezze dosimetriche di partenza l'unica a non avere un nome proprio nel Sistema Internazionale è quella relativa all'esposizione di ionizzazione; l'importanza di questa grandezza è andata via via diminuendo nella letteratura specialistica. Il Decreto 230/95 ad esempio non la utilizza affatto. Comunque è bene tener presente che molti degli strumenti meno recenti sono tarati avendo come riferimento la ionizzazione dell'aria e la sua vecchia unità di misura, alla quale veniva attribuito il nome di **röntgen**.

10.3 RETE NAZIONALE DI ALLARME E RILEVAMENTO DELLA RICADUTA RADIOATTIVA DEL C.N.VV.F.

Eventi incidentali locali o esterni al territorio nazionale, seguiti da una ricaduta di particelle radioattive anche a grande distanza dal luogo del sinistro (fall-out), possono essere rilevati e monitorati per mezzo di strumenti di tipo fisso. In Italia esistono diverse reti di misura della radioattività. Tra queste assume particolare rilievo la **rete nazionale di allarme e rilevamento della ricaduta radioattiva** del Ministero dell'interno - Corpo nazionale dei vigili del fuoco, in quanto costituita di un consistente numero di stazioni di misura, distribuite in modo uniforme su tutto il territorio nazionale, funzionanti 24 ore su 24, tutti i giorni dell'anno. Tale rete, oltre a soddisfare le esigenze connesse con i compiti di istituto propri del C.N.VV.F., concorre autonomamente al sistema delle reti nazionali, in virtù delle disposizioni riportate nel D.Lgs. 230/95.

1 Si rammenta che il rateo è indicato anche come intensità

Negli anni '60, periodo di realizzazione della prima versione, la rete era costituita da 1630 stazioni di misura, ubicate in siti aventi determinate caratteristiche fisico - geometriche, scelti nelle sedi di servizio del C.N.VV.F., dell'Arma dei Carabinieri e, successivamente, del Corpo forestale dello Stato. La rete aveva all'epoca essenzialmente scopi di difesa civile da eventuali esplosioni di tipo bellico. Le apparecchiature necessitavano di procedure manuali sia per la lettura delle misure sia per la trasmissione dei dati dalle stazioni di rilevamento ai rispettivi centri regionali di raccolta ed elaborazione. Questi ultimi, ubicati presso le sedi degli Ispettorati regionali ed interregionali del C.N.VV.F., avevano il compito di coordinare le attività in ambito locale, di supervisionare gli eventuali allarmi per il superamento della soglia stabilita e di determinare e raffigurare, in caso di gravi incidenti, la situazione radiologica e di comunicarla al Centro operativo del Ministero dell'interno. Fino agli inizi degli anni '80, le apparecchiature di misura erano a camera di ionizzazione, costituite da una sonda, posizionata all'esterno, collegata ad un pannello di comando e visualizzazione ubicato in locale presidiato, distante fino a 50 metri dalla sonda stessa. I complessi così costituiti erano:

- **ionimetro** denominato **RA7**, in 175 unità, avente funzioni di capomaglia (in funzione 24 ore su 24), con campo di misura dell'intensità di esposizione da 0,1 mR/h a 500 R/h, soglia di allarme a 0,2 mR/h e registratore grafico;
- **ionimetro** denominato **RA5**, in 1455 unità, con campo di misura dell'intensità di esposizione da 10 mR/h a 500 R/h. Il passaggio successivo fu l'adozione di apparecchiature di nuova concezione, nei modelli denominati **XR-29** e **XR-29B**, a tubo G.M. e lettura digitale, in grado di rilevare sia valori di emergenza sia valori prossimi al fondo naturale, con campo di misura dell'intensità di esposizione da 10 mR/h a 999 R/h. La predetta strumentazione si è poi evoluta nel modello **XR-29C**, sempre a lettura digitale, in grado di rilevare l'intensità di dose gamma assorbita in aria, con campo di misura da 10-6 a 999 cGy/h.



Fig. 130 - XR-29C

Attualmente tutte le apparecchiature di vecchio tipo RA5 e RA7 sono state ritirate dal servizio, sia perché vetuste e non più riparabili, sia perché rilevavano una grandezza fisica non compatibile con la nuova rete automatica, appresso descritta. Nell'anno 1986 venne completata nella regione Umbria la rete automatica sperimentale, costituita da 35 terminali di telemisura e 2 centri regionali per la raccolta e l'elaborazione dei dati. Uno dei due centri fu realizzato a Napoli, presso la sede dell'Ispettorato regionale, con funzioni alternative al centro primario in Perugia.



Fig. 131 - Nuova stazione (aperta)



Fig. 132 - Nuova stazione (chiusa)

La legge 8 agosto 1996 n.421 ha autorizzato l'ammodernamento della rete nazionale di rilevamento della radioattività. Al momento è in avanzata fase di realizzazione il nuovo sistema completamente automatico, che sarà completato entro breve tempo (si prevede entro l'anno 2001). Tale sistema è progettato per monitorare tutto il territorio nazionale in tempo reale, senza soluzione di continuità, a meno di guasti delle apparecchiature di misura, e di effettuare previsioni e calcoli d'interesse civile e militare. La nuova rete nazionale nell'insieme prevede 1237 stazioni di telemisura, 16 centri regionali di raccolta ed elaborazione dati e 1 centro nazionale, nonché una stazione di misura del particolato atmosferico. Le principali caratteristiche generali del nuovo sistema sono:

- la completa automazione delle funzioni;
- la possibilità, da parte dei centri regionali, di effettuare l'interrogazione ciclica di tutte le stazioni in ambito regionale ogni di trenta minuti;
- la flessibilità dei centri di raccolta ed elaborazione dati, capaci di sostituirsi a vicenda;
- la possibilità, da parte delle stazioni di telemisura, di fornire segnali di allarme, in caso di superamento della soglia prefissata, di andamento anomalo dei valori rilevati o di malfunzionamento;
- l'autodiagnosi e l'autoriparatura automatica delle stazioni di telemisura;
- la protezione dall'impulso e dall'interferenza elettromagnetica delle stazioni di telemisura;
- l'elaborazione dei dati rilevati e la rappresentazione grafica della situazione radiologica.

Il centro nazionale di raccolta e ogni centro regionale sono in grado di acquisire, gestire ed elaborare i dati delle 1237 stazioni. I centri regionali sono però configurati per acquisire ogni 30 minuti le informazioni di 200 stazioni. Ogni stazione colloquia con il proprio centro regionale di raccolta, con un altro destinato a svolgere funzioni di riserva, in caso di caduta del primo, e con il centro nazionale. In caso di allarme, la segnalazione della stazione di telemisura perviene automaticamente a tutti e tre i centri suddetti. I collegamenti fra le stazioni di telemisura, il centro nazionale ed i centri regionali sono realizzati mediante linea telefonica commutata e rete radio, per ridondanza, utilizzando le frequenze assegnate al Corpo nazionale dei vigili del fuoco. Le trasmissioni tra centri di raccolta sono realizzate mediante linea trasporto dati a pacchetto. La legge 421/96, sempre nell'articolo 10, prevede inoltre che "il Ministero dell'Industria, sentiti i ministeri della Sanità e delle Finanze, provveda all'acquisto e all'installazione di sistemi di scintillazione disposti a portale per la rilevazione automatica della radioattività dei metalli ai valichi di frontiera, alla cui utilizzazione e controllo è addetto il personale del Corpo nazionale dei vigili del

fuoco nell'ambito della rete di rilevamento".

10.4 SERVIZIO DOSIMETRICO NAZIONALE

Nel Corpo nazionale dei vigili del fuoco ha grande importanza il **Servizio dosimetrico**, che svolge compiti di vigilanza per la tutela della salute del personale addetto ad operazioni di intervento in presenza di radiazioni ionizzanti. Il servizio provvede ad inviare ad ogni Comando un numero adeguato di dosimetri a termoluminescenza (al fluoruro di litio), da utilizzare in occasione degli interventi con temuta presenza di radiazioni ionizzanti. I dosimetri, applicati agli indumenti esterni in interventi in presenza di sostanze radioattive, vengono, immediatamente dopo l'uso, inviati al Laboratorio di difesa atomica del centro studi ed esperienze, che è in grado di misurare con precisione la dose assorbita già da valori di qualche microsievert (mSv). Con periodicità trimestrale il Laboratorio provvede comunque alla sostituzione dei dosimetri distribuiti e non utilizzati, per la loro rigenerazione.

10.5 INTERVENTI IN PRESENZA DI SOSTANZE RADIOATTIVE

Il Corpo nazionale dei vigili del fuoco deve intervenire ogniqualvolta si presenti un pericolo per i cittadini e/o i loro beni, a causa di radiazioni ionizzanti comunque originate. Le squadre radiometriche che effettuano gli interventi per soccorso tecnico sono attrezzate per una serie di operazioni, fra le quali, in sintesi, si segnalano:

- ricerca di sorgenti e sostanze radioattive in genere;
- intervento per sorgente radioattiva esposta;
- controllo e contenimento di contaminazioni superficiali;
- monitoraggio di contaminanti in aria;
- incendi con sostanze radioattive coinvolte;
- assistenza a persone contaminate;
- incidenti durante il trasporto di materiale radioattivo;
- controllo di colli radioattivi danneggiati;
- attuazione delle azioni previste dai piani di emergenza. Di seguito si forniscono alcuni cenni su aspetti relativi all'impiego dei principali strumenti in dotazione alle squadre.

10.6 STRUMENTI

In sintesi il C.N.VV.F. dispone di un complesso sistema di apparecchiature per la rilevazione e misura della radioattività. Tali apparecchiature possono essere così schematizzate:

- strumenti standard per gli interventi ordinari (sonde, radiometri e dosimetri);
- sistemi di misura della concentrazione della contaminazione radioattiva in aria (catena beta), da utilizzare in situazioni di "attenzione o emergenza radiologica";
- strumenti per l'analisi di matrici ambientali, campioni di terreno, vegetazione, alimenti, ecc. (catena di misura per spettrometria gamma);
- laboratori mobili in grado di operare in zone contaminate (ACT/NUC in dotazione ai GOS);
- automezzi attrezzati per i rilevamenti radiometrici (CRRC/NBC).

A questi si aggiungono la rete nazionale di rilevamento della radioattività ed i sistemi a scintillazione per il controllo dei metalli ai valichi di frontiera a cui si è fatto cenno sopra. E' da sottolineare che gli strumenti di rilevamento delle radiazioni, considerato che queste ultime non possono essere avvertite dai sensi, svolgono anche il ruolo di dispositivi di protezione per il personale. Una buona conoscenza del loro funzionamento e la loro perfetta funzionalità costituiscono un aspetto fondamentale per garantire la radioprotezione. In questa sede è opportuno affrontare alcune questioni generali e metodologiche relative all'impiego degli strumenti in dotazione. I radionuclidi possono emettere radiazioni alfa, beta e gamma che agiscono in modo assai diverso fra loro. Per affrontare con precisione la valutazione del rischio si dovrebbero conoscere una serie di elementi quali:

- tipo di radionuclide e di radiazione emessa;
- attività ad un tempo noto;
- tempo di dimezzamento;
- stato fisico, ecc.

In alcuni casi ciò è possibile (sorgente smarrita), ma in altri tali dati non si conoscono (ricerca di sorgente sconosciuta). Cominciando con le **radiazioni gamma** (le altre radiazioni sono molto meno penetranti), consideriamo le sonde oggi più impiegate fra quelle in dotazione alle squadre VV.F.: **sonda F118Cg** e **sonda Geiger-Müller 145** che permettono misurazioni in collegamento con il **radiometro digitale RA141C** o il radiometro analogico **RA141BF**. Scegliendo una delle due sonde si fissa nel contatore un diverso fondo scala (RA141BF) o il tempo di integrazione della misura (RA141C). Il tubo scintillatore ha una sensibilità maggiore del tubo di Geiger-

Müller ed è pertanto maggiormente impiegato per la ricerca di sorgente, ma non consente misure quantitative. Nel caso in cui la sorgente emetta **radiazioni alfa**, per quanto già detto in precedenza, la sua presenza può essere rilevata solo quasi a contatto della sorgente stessa con sonde quali la **SL103** e la precedente versione **F118a**. Infine per le **radiazioni beta**, più penetranti di quelle alfa, ma incapaci di attraversare il vetro del tubo Geiger-Müller, va usata la **sonda GF 145** vista sopra. Essa infatti è dotata di una finestra in mica estremamente sottile che resta schermata da una protezione durante le misure della radiazione gamma. Viceversa aprendo la finestra (togliendo il tappo di protezione), il tubo misurerà contemporaneamente gli effetti delle radiazioni beta e gamma e dal confronto delle due misure (a finestra aperta e chiusa) si risalirà al contributo della radiazione beta.

APPROFONDIMENTO

Sonda campale a scintillazione F118Cg

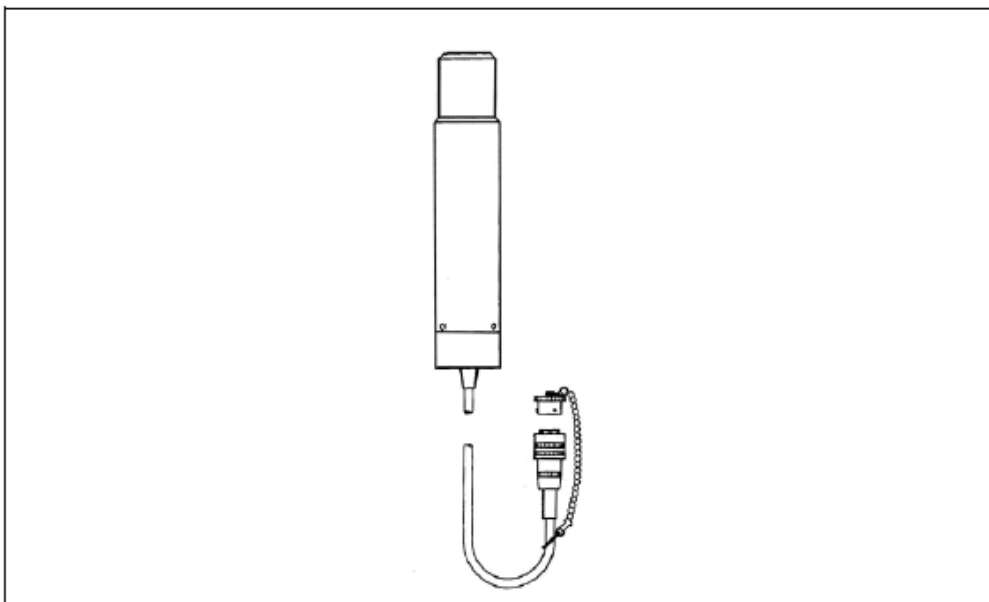


Fig.133

Caratteristiche

- Idonea per la ricerca di sorgenti gamma.
- Elemento rivelatore scintillatore di Ioduro di sodio NaI (con Tallio, Tl) con involucro di protezione di grande robustezza.
- Sensibilità alle radiazioni gamma del Cobalto 60 con soglia minima di discriminazioni tra le energie dei fotoni di 20 keV.
- Impiego con temperature comprese tra -20°C e 50°C .
- Peso circa 0,9 kg.

APPROFONDIMENTO

Sonda campale a tubo di Geiger GF145

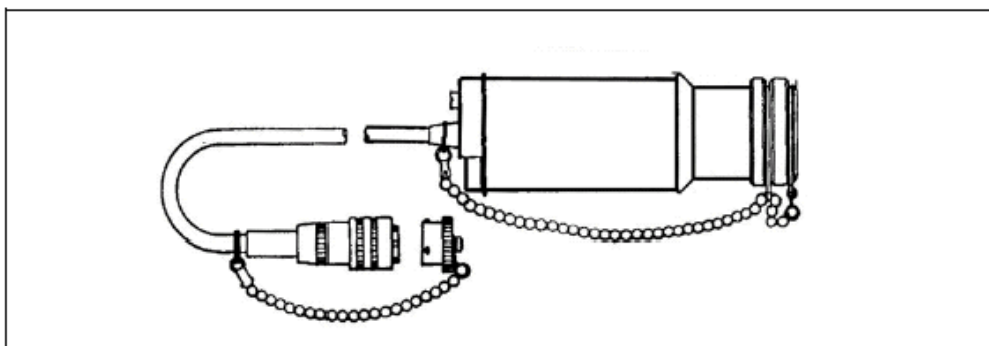


Fig.134

Caratteristiche

- Idonea per misurazioni di radiazioni gamma o beta.
- Elemento rivelatore tubo G.M. ad alogeno.
- Sensibilità alla radiazione gamma per radiazioni di riferimento dovute al radionuclide Cobalto 60, 10 impulsi al

secondo corrispondenti ad un rateo (intensità) di esposizione di ionizzazione pari a 2,58 10⁻⁷ C/kg h (pari a 1 milliröntgen su ora, 1mR/h).

- Variazione della risposta della sonda al variare delle energie dei fotoni gamma (da 80 keV a 3 MeV) contenuta entro il 20%.
- Finestra frontale in mica di densità superficiale prossima a 2-3 mg/cm², diametro 27,8 mm, utilizzabile per le misure della radiazione beta a finestra aperta.
- Sorgente radioattiva (beta emettitore) sigillata di Stronzio 90 e Ittrio 90 per la verifica del funzionamento.

APPROFONDIMENTO

Sonda a scintillazione SL103

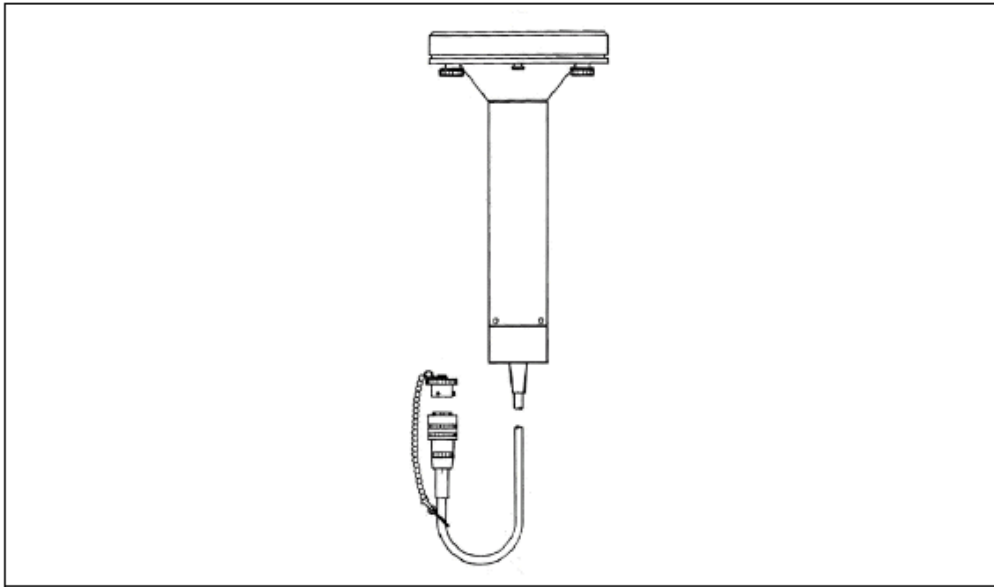


Fig.135

Caratteristiche

- Idonea per misurazioni di radiazioni alfa.
- Elemento rivelatore Solfuro di zinco (ZnS) con argento (Ag), di 125 mm di diametro su supporto di perspex dello spessore di 3 mm.
- Finestra di ingresso dello scintillatore in plastica metallizzata di 0,7 mm di spessore.
- Area utile dello scintillatore 80 cm².
- Rendimento della sonda sul foro centrale della griglia di protezione circa il 50% per le radiazioni alfa emesse da una sorgente di Americio 241 posta da 1 cm dal rivelatore.
- Variazione di sensibilità sulla superficie dello scintillatore contenuta entro il 10%. Insensibilità alle radiazioni gamma e beta.
- Regolazione dell'alta tensione per il fototubo. Impiego tra - 20°C a 50°C.

APPROFONDIMENTO

Radiometro campale Ra141C

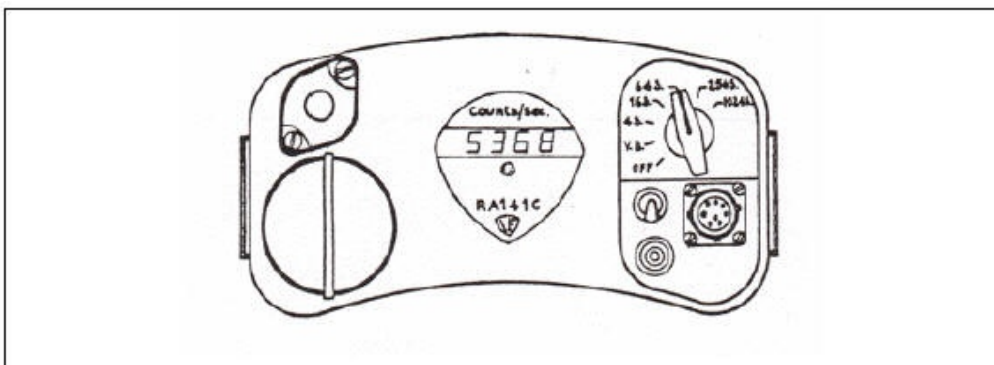


Fig.136

Caratteristiche

- Contatore digitale accoppiabile a sonde di vario tipo.
- Tempi di integrazione regolabili tra 4 e 1024 secondi.
- Il risultato visualizzato è la media delle ultime otto misure.
- Portata tra 0,001 impulsi al secondo a 9999 impulsi al secondo.
- Risultato espresso su un visualizzatore a quattro cifre, con lo spostamento automatico della virgola.
- Controllo della tensione sempre tramite visualizzatore.
- Possibilità di impiego a tracolla, spigoli arrotondati.

Le sonde utilizzabili con questo radiometro sono la quasi totalità di quelle in dotazione ai Comandi provinciali dei VV.F.

10.6.1 Interventi di emergenza

Il D.Lgs 241/2000, che ha recepito la direttiva 96/29 EURATOM, ha stabilito i limiti di dose per il personale impegnato negli interventi di emergenza compreso il personale dei vigili del fuoco. Tali limiti sono stati già forniti al paragrafo 8.4 e di seguito si richiamano: dose efficace 20 mSv/anno solare dose equivalente 150 mSv/anno solare per il cristallino 500 mSv/anno solare per la cute 500 mSv/anno solare per mani, avambracci, piedi e caviglie. Al riguardo si sottolinea che il decreto ha in sostanza colmato una lacuna, in quanto i precedenti limiti di dose erano stabiliti soltanto da circolari. Lo stesso decreto prevede la istituzione di squadre speciali di intervento per le quali valgono livelli operativi più elevati:

1. 100 mSv di dose efficace;
2. 300 mSv di dose equivalente al cristallino;
3. 1 Sv di dose equivalente alle mani, agli avambracci, ai piedi ed alle caviglie;
4. 1 Sv di dose equivalente alla pelle.

Una esposizione al di sopra dei predetti livelli è ammessa, in via eccezionale, soltanto allo scopo di salvare vite umane, per volontari scelti tra le squadre speciali che siano, comunque, informati dei rischi connessi all'intervento da effettuare.

10.6.2 Individuazione e eventuale recupero di una sorgente smarrita

Le sorgenti radioisotopiche sono classificabili in sorgenti **sigillate** e **non sigillate**.

Le prime sono costituite da radionuclidi fortemente legati tra loro o contenuti in involucri di protezione in modo tale che risulti improbabile la dispersione delle materie radioattive nell'ambiente in condizioni normali di impiego.

Le seconde sono quelle che non rispondono ai requisiti precedenti.

I vigili del fuoco nell'espletamento della loro attività possono essere chiamati a ricercare una sorgente radioattiva smarrita. La quasi totalità delle sostanze radioattive emette contemporaneamente radiazioni b e g oppure a e g. La squadra radiometrica con l'ausilio del sistema a scintillazione gamma può accorgersi facilmente dell'avvicinamento alla sorgente dall'aumento del numero degli impulsi al secondo della strumentazione. Infatti, come detto, nell'ipotesi che la sorgente sia concentrata, dimezzando la distanza dalla stessa il numero di impulsi al secondo quadruplicano. Se più operatori si muovono contemporaneamente in diverse direzioni è possibile individuare una prima zona con valori prossimi ad un rateo di equivalente di dose pari ad esempio a 1mSv/h, limite che, come abbiamo detto, indica con alta probabilità la presenza di un emettitore. Se la sorgente si trova in posizione tale da non creare ulteriori pericoli, può essere sufficiente la delimitazione della zona interessata per impedirne l'accesso al pubblico. Il raggio di detta zona può essere fissato in modo precauzionale prendendo come riferimento il valore precedente di 1mSv/h oppure valori diversi a seconda delle circostanze (ad esempio 10 mSv/h, limite medio orario per i lavoratori professionalmente esposti, oppure 25 mSv/h, limite di riferimento per la delimitazione della zona controllata). Se invece la sorgente deve necessariamente essere rimossa, la squadra VV.F., dotata di dosimetri personali pianificherà l'operazione con l'accortezza che nessun operatore superi i valori di dose precedentemente indicati (20mSv).

10.6.3 Contaminazione

Le sorgenti di radionuclidi usate nei laboratori di ricerca, nella sanità e nell'industria, sono schermate da contenitori metallici (Fig.137). Nonostante ciò la radiazione gamma estremamente penetrante fuoriesce dagli stessi, imponendo la segnalazione con appositi cartelli di attenzione (Fig.138).



Fig.137

Fig.138

Nel caso in cui le sorgenti non siano costituite da solidi compatti (sorgenti non sigillate) vanno poste in essere altre precauzioni. In questo caso le sorgenti vengono inserite in appositi involucri per impedirne la diffusione nell'ambiente. Se il contenitore si danneggia (fessurazione, corrosione, urto, ecc.) la sostanza radioattiva può disperdersi nell'ambiente producendo contaminazione. Questa può essere prodotta anche da una sorgente sigillata qualora sottoposta a sollecitazioni capaci di disgregarla (incendio). Il pericolo di contaminazione viene segnalato con un apposito segnale di attenzione (Fig.139).



Fig.139

Confrontando i due ideogrammi dei cartelli ci si rende immediatamente conto che la contaminazione può provocare un pericolo diffuso su una scala più vasta rispetto al caso della sorgente sigillata di piccole dimensioni di cui si è parlato sopra. Il danneggiamento delle sorgenti può provocare la dispersione di materiale radioattivo su una superficie, nell'aria (ad es. con formazione di aerosol a causa di un incendio coinvolgente il materiale radioattivo), nell'acqua (ad es. a causa di un danneggiamento del controllo degli scarichi in un ospedale che utilizza sorgenti per uso terapeutico). La contaminazione di una persona può avvenire allora per contatto, inalazione o ingestione di particelle radioattive liberatesi a seguito dell'incidente. Data la diffusione particolarmente insidiosa e la pericolosità di alcuni radionuclidi se immessi nell'organismo, i metodi di protezione da un'eventuale contaminazione sono diversi rispetto a quelli adottati nel caso di una sorgente sigillata che emette radiazioni gamma. E' fondamentale, in questo caso, adottare tecniche preventive capaci di impedire alle particelle contenenti i radionuclidi di venire a contatto o peggio ancora di penetrare all'interno del corpo. Il personale, in un intervento di possibile contaminazione radioattiva, deve impiegare indumenti monouso o tute idonee e respiratori o filtri capaci di trattenere particelle contaminanti. Il monitoraggio della radioattività in aria avviene raccogliendo su appositi filtri le particelle contenute in aria. Attraverso l'uso di una pompa e di un'apposita attrezzatura indicata come unità volumetrica si filtra un certo volume di aria; successivamente il filtro contaminato viene posto all'interno di un pozzetto in piombo che lo schermava dalle radiazioni esterne. Una sonda per la misura della radiazione, collegata ad un intensimetro, viene inserita nel pozzetto nelle immediate vicinanze del filtro. La misura dei conteggi al secondo (cps) permette di risalire alla concentrazione dell'attività dei radionuclidi beta e gamma emittenti presenti nell'aria.

APPROFONDIMENTO

L'insieme dell'attrezzatura per simili misure, normalmente detta **catena b**, è illustrata nella figura che segue.

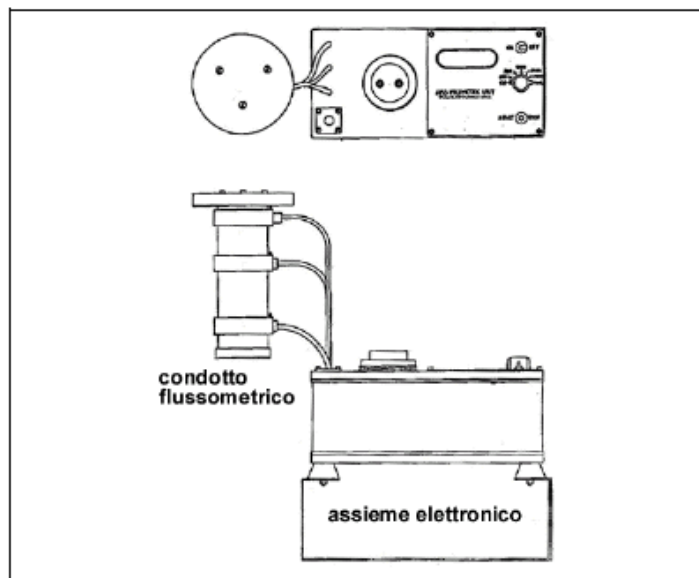


Fig.140

Per i particolari del pozzetto e del suo uso si vedano le figure successive.

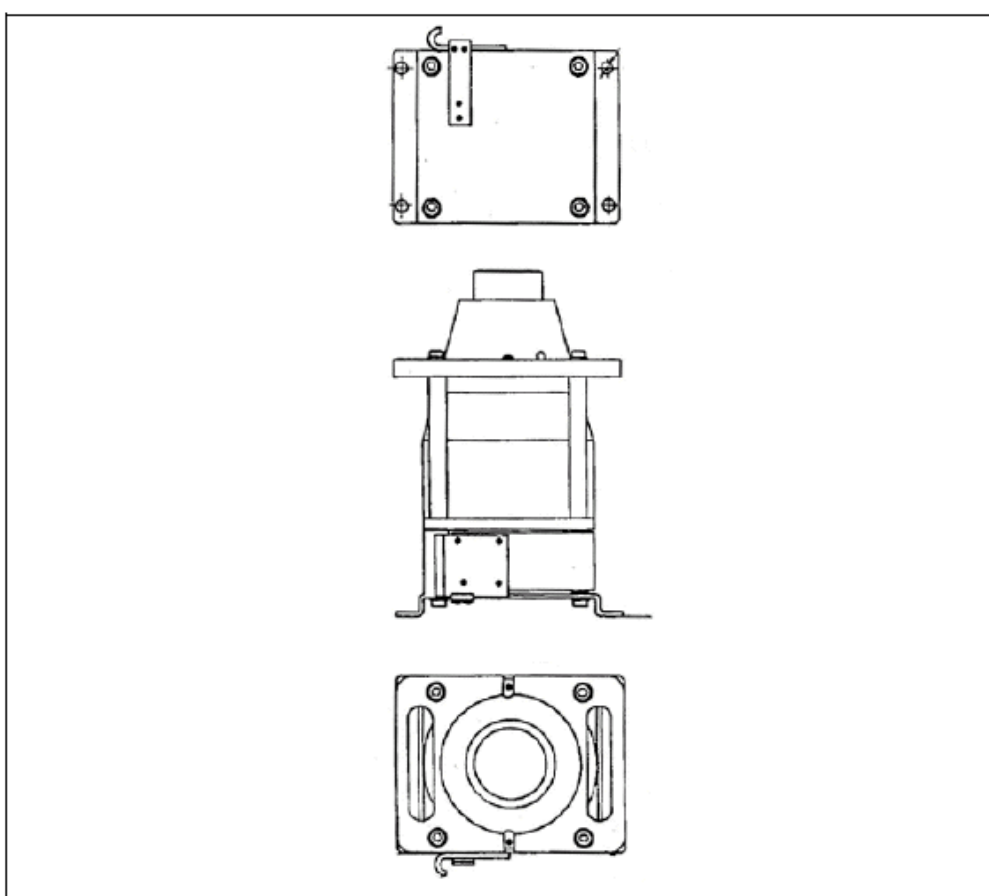


Fig.141 – Pozzetto in piombo

Il pozzetto è uno schermo in piombo per misure di radiazioni beta e gamma su portapreparati. Schermaggio del tipo G.M. maggiore di 5 centimetri in tutte le direzioni. Piccola percentuale di antimonio. Possibilità di installazione su automezzo mediante viti. Possibilità di trasporto a mezzo maniglie. Errore di assialità del portapreparati (posizionato a scatto) inferiore al millimetro. Dimensioni dell'alloggiamento estraibile diametro 58 mm altezza 6 mm. Distanza tra il tubo e il portapreparati di circa 3 mm. Piombo verniciato e trattato per evitare azione tossica sul personale. Peso circa 46 kg.

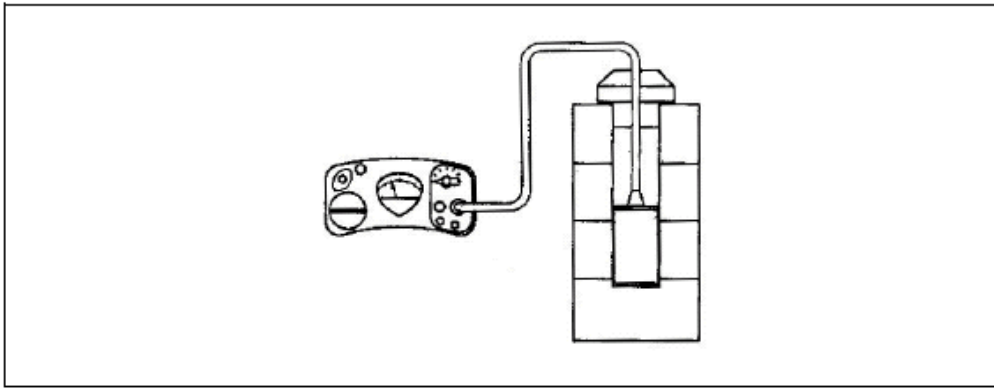


Fig.142 - Esempio di misura con radiometro e pozzetto

10.6.4 Incendio

In generale in un incendio coinvolgente sostanze radioattive non si modifica l'attività dell'elemento radioattivo, insensibile all'azione chimica e fisica della combustione, ma l'incendio, producendo fumi, polveri, aerosol, sostanze radioattive vaporizzate, diffonde questa attività anche molto lontano rispetto all'origine dell'incidente. In questo tipo di interventi è necessario quindi proteggersi contro la contaminazione della pelle e degli occhi e la inalazione delle particelle e dei fumi. La squadra di intervento dovrà indossare le tute protettive (Fig.143), maschere con filtri adeguati per polveri e fumi radioattivi o, meglio, autorespiratori. Il fuoco dovrà essere attaccato restando sopra vento con estintori a polvere o a CO₂ dalla massima distanza possibile, evitando di usare acqua e, solo se indispensabile per spegnere l'incendio, utilizzando getti nebulizzati per non disperdere la contaminazione e non provocare, ad esempio in un laboratorio, la rottura di altri contenitori con sostanze nocive.



Fig.143

L'intervento va effettuato coinvolgendo il minor numero di persone possibile. Il personale coinvolto dovrà essere munito di dosimetri personali e la sua attrezzatura al termine delle operazioni dovrà essere raccolta in idonei contenitori e sarà successivamente decontaminata o smaltita come rifiuto radioattivo, dopo un adeguato monitoraggio. Molto importanti sono le operazioni di prima **decontaminazione** e monitoraggio del personale coinvolto nell'incendio.

APPROFONDIMENTO

Decontaminazione

La principale operazione di decontaminazione esterna di una persona, venuta a contatto con frammenti radioattivi, che non presenta ferite consiste in un lavaggio accurato della pelle con acqua e sapone **1**. L'efficacia del trattamento può essere controllata misurando sia l'attività residua sul corpo che, eventualmente, quella dell'acqua servita per il lavaggio. Particolare cura dovrebbe essere rivolta ad alcune parti del corpo (occhi, naso, bocca). Per il lavaggio in questo caso possono essere utili soluzioni isotoniche aventi concentrazione salina simile a quella dei tessuti irrorati. In caso di ferite si deve cercare di impedire immediatamente la penetrazione delle sostanze emittenti all'interno del corpo facendo ad esempio fuoriuscire il sangue dalla ferita e lavandola accuratamente. Nell'ipotesi che tra i radionuclidi vi sia plutonio è consigliato l'uso di prodotti specifici che riducano la possibilità di contaminazione del sangue.

10.7 RISCHIO NUCLEARE

10.7.1 Introduzione (scala internazionale degli eventi nucleari)

La più importante organizzazione mondiale che si occupa di energia nucleare, l'Agencia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), nel marzo 1992 ha approvato una Scala Internazionale degli Eventi Nucleari (INES)², al fine di rendere omogenea la comunicazione al pubblico di un evento anomalo in una centrale o altro impianto nucleare o durante il trasporto di materiale radioattivo. In essa come nelle scale utilizzate nei terremoti ai valori più bassi corrisponde l'evento meno catastrofico. Si parte dal valore zero a cui corrisponde una semplice deviazione (deviation), una fluttuazione dal normale funzionamento dell'impianto che non comporta conseguenze per i lavoratori; seguono poi tre livelli di guasto (incident) con dosi crescenti per i lavoratori esposti; e infine quattro gradi di incidente (accident) con conseguenze sempre più gravi all'esterno dell'impianto stesso. Come rappresentato nella figura 144.

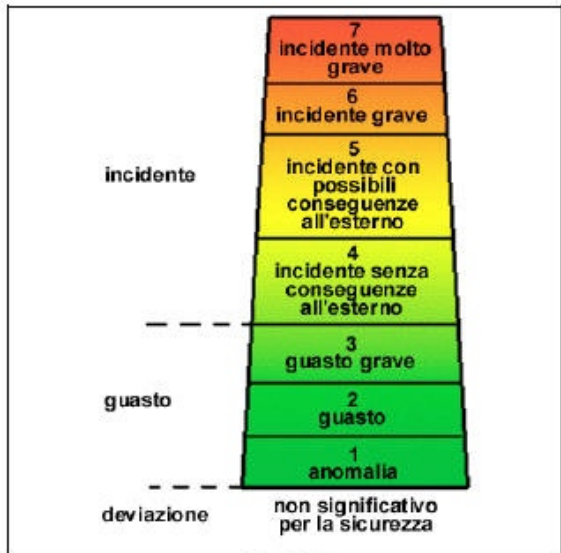


Fig. 144

1 In caso di contaminazione localizzata si può utilizzare una soluzione al 2,5% di NaHCO₃ che non deve essere lasciata troppo a lungo sulla pelle per evitare abrasioni.

2 INES (International Nuclear Event Scale). IAEA International Atomic Energy Agency.

Sebbene la scala sia pensata per dare un'informazione immediata alla popolazione, gli esperti dell'Agencia si sono sforzati anche di definire in modo sufficientemente accurato (e in alcuni casi con misure di attività e di dosi efficace) i diversi livelli della stessa, facendo anche alcuni esempi di incidenti già avvenuti nel passato. La tabella 10.3 riassume le loro considerazioni relative alla scala degli eventi nucleari significativi dal punto di vista della sicurezza.

Tabella 10.3 Scala internazionale degli eventi nucleari (ines)

LIVELLO	DEFINIZIONE	CRITERI	ESEMPI
7	Incidente molto grave	Rilascio all'esterno di una elevata quantità di materiale radioattivo contenuto in un impianto di grandi dimensioni (ad esempio nel nocciolo di un reattore di potenza). Il rilascio è tipicamente costituito da una miscela di prodotti di fissione a vita breve e lunga (in quantità equivalente dal punto di vista radiologico a diverse decine di migliaia di terabecquerel di iodio 131). Tale rilascio dovrebbe portare ad effetti acuti sulla salute; ad effetti ritardati sulla salute della popolazione diffusi in un'area molto vasta, probabilmente coinvolgente più di una nazione; a conseguenze ambientali a lungo termine.	Impianto nucleare di Chernobyl, URSS (oggi Repubblica Ucraina) 1986

LIVELLO	DEFINIZIONE	CRITERI	ESEMPI
6	Incidente grave	Rilascio all'esterno di materiale radioattivo (in quantità equivalente dal punto di vista radiologico a valori compresi tra le migliaia e le decine di migliaia di terabecquerel di iodio 131). Un tale rilascio dovrebbe probabilmente portare alla completa attuazione delle contromisure facenti parte del piano di emergenza esterno al fine di limitare gravi effetti sulla salute della popolazione.	Impianto nucleare per il trattamento di combustibili irradiati di Kyshtym, URSS (oggi Rep. Russa) 1957
5	Incidente con possibili conseguenze all'esterno dell'impianto	<p>Rilascio all'esterno di materiale radioattivo (in quantità equivalente dal punto di vista radiologico ai valori compresi tra le centinaia e le migliaia di terabecquerel di iodio131). Un tale rilascio dovrebbe probabilmente portare all'attuazione parziale delle contromisure previste dal piano di emergenza esterna per ridurre la probabilità di effetti sulla salute della popolazione.</p> <p>Danneggiamento grave di un impianto nucleare. Può avvenire in seguito ad un danneggiamento di gran parte del nocciolo di un impianto nucleare di potenza, ad un incidente di criticità elevata o ad un incendio di grandi dimensioni o ancora ad un'esplosione che conduca al rilascio di notevoli quantitativi di materiale radioattivo all'interno dell'installazione.</p>	<p>Impianto nucleare di Windscale UK 1957</p> <p>Impianto nucleare di Three Mile Island USA 1979</p>

LIVELLO	DEFINIZIONE	CRITERI	ESEMPI
4	Incidente senza conseguenze significative all'esterno dell'impianto	<p>Rilascio all'esterno di materiale radioattivo avente come conseguenza una dose di alcuni millisievert alla persona più esposta esternamente al sito. Generalmente in conseguenza di tale rilascio non vi è la necessità di azioni protettive esternamente al sito, fatta eccezione in taluni casi per il controllo locale della catena alimentare.</p> <p>Danneggiamento significativo dell'impianto nucleare. Un tale incidente potrebbe implicare danni quali la fusione parziale del nocciolo di un impianto di potenza, o eventi comparabili in installazioni di altro tipo, con conseguenti gravi problemi di recupero internamente al sito.</p> <p>Irradiazione di uno o più lavoratori che comporti una sovraesposizione con notevoli probabilità di morte a breve scadenza.</p>	<p>Impianto nucleare per il trattamento di combustibili irradiati di Windscale UK 1973</p> <p>Insieme critico Buenos Aires, Argentina, 1983</p>
3	Guasto grave	<p>Rilascio all'esterno di materiale radioattivo al di sopra dei limiti prescritti, avente come conseguenza un equivalente di dose efficace, alla persona più esposta esternamente al sito, dell'ordine dei decimi di millisievert. Per tali rilasci non sono necessarie misure protettive esterne al sito.</p> <p>Eventi interni al sito come conseguenza dosi ai lavoratori tali da produrre effetti acuti sulla salute e/o un evento come conseguenza una grave diffusione della contaminazione radioattiva, per esempio alcune migliaia di terabecquerel di attività rilasciati in un contenimento secondario dal quale il materiale può essere riportato ad un'area di stoccaggio opportuna.</p> <p>Eventi nei quali un ulteriore guasto dei sistemi di sicurezza porterebbero a condizioni di incidente o a una situazione in cui i sistemi di sicurezza sarebbero incapaci di prevenire un incidente se si sviluppassero taluni eventi iniziatori.</p>	<p>Centrale nucleare di Vandellos, Spagna 1989</p>

LIVELLO	DEFINIZIONE	CRITERI	ESEMPI
2	Guasto	<p>Eventi con un significativo malfunzionamento nei sistemi di sicurezza ma con un margine sufficiente dei sistemi di difesa successivi per far fronte a ulteriori guasti.</p> <p>Un evento avente come conseguenza dosi ai lavoratori superiori alle dosi massime ammissibili secondo la legge e/o un evento che determini la presenza di quantità significative di radioattività in aree dell'installazione ove ciò non fosse previsto dal progetto e che richieda azioni correttive.</p>	
1	Anomalia	<p>Deviazioni dal normale regime di funzionamento. Ciò può essere dovuto a guasti di apparecchiature, a errori umani o inadeguatezza procedurali. Tali deviazioni dovrebbero essere distinte dalle situazioni ove i limiti e le condizioni di funzionamento non sono superate e che possono essere gestite in maniera corretta secondo procedure adeguate. Queste sono tipicamente "al di sotto della scala".</p>	
0	Deviazione	NON SIGNIFICATIVO PER LA SICUREZZA	

10.7.2 Piani di emergenza degli impianti italiani e interventi del C.N.VV.F.

In Italia non esiste oggi nessun reattore nucleare di potenza in funzione. Il limitato sviluppo del nucleare italiano ha lasciato comunque una quantità di rifiuti radioattivi. Nel precedente capitolo abbiamo dato un inventario del materiale nucleare presente sul territorio nazionale agli inizi del 1998. La disattivazione delle centrali (Garigliano, Latina, Trino, Caorso) e di alcuni reattori di ricerca, degli impianti di fabbricazione combustibili e di altri depositi minori, apre il problema della gestione dei rifiuti radioattivi. L'individuazione e la realizzazione di un sito nazionale centralizzato per lo smaltimento dei rifiuti a bassa e media attività e per l'immagazzinamento a medio termine, in apposita struttura, del combustibile irraggiato e dei rifiuti ad alta attività è ancora lontana. La figura 145 mostra l'ubicazione dei principali siti nucleari presenti sul territorio nazionale. Esistono inoltre diversi piccoli reattori in funzione che potrebbero provocare emergenze radiologiche, ovvero eventi incidentali tali da far superare a gruppi della popolazione i limiti di dose fissati dalla normativa. Senza contare il possibile traffico di materiale nucleare e la presenza di numerosi installazioni nucleari poste in prossimità dei nostri confini in nazioni ancora fortemente nuclearizzate (Fig.146). A ciò va aggiunta la possibilità di incidenti a navi con propulsione nucleare o la caduta di satelliti **1** o sonde spaziali **2** che pure hanno a bordo sostanze radioattive



Fig. 145 - Principali centri italiani che ospitano impianti o depositi nucleari



Fig. 146 - Centrali nucleari in prossimità dei confini nazionali

1 In genere i satelliti utilizzano l'energia solare per il funzionamento della strumentazione di bordo, fanno eccezione alcuni satelliti con strumentazione a microonde che impegnano forti quantitativi di energia. I resti di uno di questi nel 1978 furono ritrovati su una vasta porzione del nord del Canada, pressoché disabitata.

2 L'utilizzo dell'energia nucleare sulle sonde spaziali per il funzionamento della strumentazione di bordo non ha oggi alternative (vista la lontananza dal sole). Essa si avvale di due tecnologie: i generatori termoelettrici a radioisotopi in cui il decadimento radioattivo produce calore che viene utilizzato successivamente per la conversione in energia elettrica; i reattori nucleari con reazioni controllate, molto simili a quelli utilizzati nelle centrali o nelle navi a propulsione nucleare.

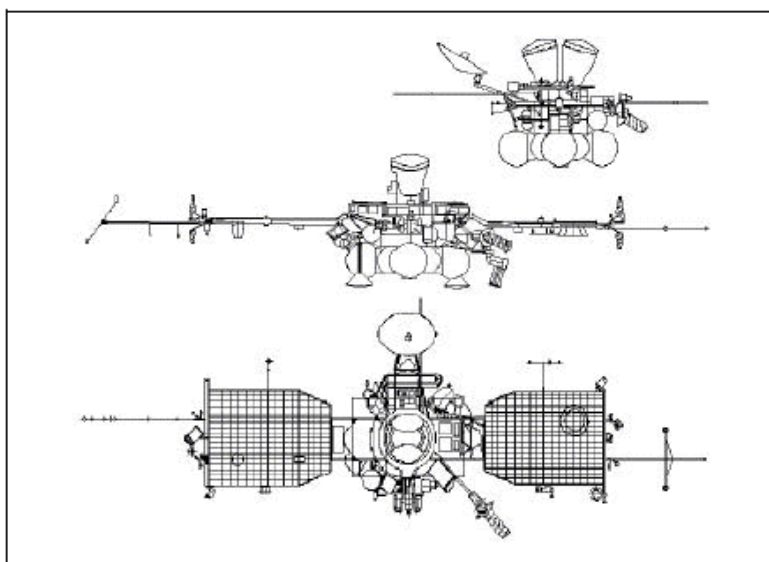


Fig.147 - Sonda Mars 96 sovietica coinvolta in un incidente nel suo rientro a terra

Il rischio nucleare, nelle sue diverse forme, implica lo sviluppo di piani di emergenza nucleari che prevedono l'intervento del Corpo nazionale dei vigili del fuoco. Detti piani di emergenza sono predisposti sul territorio della provincia dal Prefetto, che si avvale di un comitato composto tra gli altri dal Comandante provinciale dei vigili del fuoco. Per fronteggiare incidenti che avvengono in impianti al di fuori del territorio nazionale e per gli altri casi di emergenze radiologiche non correlabili con alcuna specifica area del territorio nazionale, è stato predisposto dal Dipartimento della Protezione civile e dal Ministero dell'interno il Piano Nazionale delle misure di protezione. Il punto di riferimento tecnico per l'attuazione del Piano Nazionale è il Centro di elaborazione e valutazione dati (CEVAD). Il Centro (formato da quattro membri effettivi e da quattro supplenti, tutti esperti di radioprotezione **1**, e da due membri, di cui uno supplente, designati dal servizio meteorologico dell'aeronautica militare) effettua la valutazione dei livelli di radioattività e le conseguenti esposizioni interna ed esterna. Esso si avvale di tutti i dati provenienti dalle reti di rilevamento e dà indicazioni sulle misure da adottare che vengono rese prescrittive dal Prefetto o dal Ministro della Protezione Civile. Il tipo di intervento previsto per i vigili del fuoco nei piani di emergenza nucleari viene descritto prendendo come riferimento il piano di emergenza della Casaccia, il più esteso tra i centri Enea (Fig.148), a pochi chilometri da Roma, nel quale sono attivi gli impianti: Plutonio, Triga e Tapiro.

1 Designati rispettivamente dall'ANPA, dal C.N.VV.F., dall'Istituto Superiore di Sanità e dall'ISPESL.



Fig.148

Nel caso di incidente in uno degli impianti nucleari della Casaccia, viene comunicato immediatamente al Comando provinciale dei vigili del fuoco lo stato di preallarme o allarme (nel prossimo paragrafo si definiranno meglio queste situazioni). Il piano di emergenza prevede che venga immediatamente istituito nel Comando il Centro Controllo Emergenza **1** con compiti di coordinamento tecnico delle operazioni iniziali, di rilevamento e misura della radioattività ambientale, al fine di dare una prima valutazione dei rischi e di prendere le dovute contromisure sulla base delle rilevazioni effettuate dalle squadre. Il Centro effettua la conversione delle misure da impulsi al secondo in becquerel al metro cubo (concentrazione di attività o **attività specifica**), costruisce sulle mappe della zona le curve di uguale concentrazione (isoconcentrazione) e di eguale rateo di dose, definisce quindi le zone contaminate segnalandole al Prefetto; propone le misure da adottare. Una volta attivato presso la Prefettura il Centro di Coordinamento Radiometrico, il Centro Controllo Emergenze del Comando cessa la propria attività confluendo nel nuovo coordinamento. Le squadre radiometriche di intervento dei vigili del fuoco possono essere attrezzate con

laboratorio mobile per il rilevamento della radioattività (Autocarro trasporto nucleare, contraddistinto dalla sigla ACT/NUC Fig.1492) o con automezzo di rilevamento (Carro rilevamento radiochimico, nucleare, biologico, chimico, contraddistinto dalla sigla CRRC/NBC Fig.150) per effettuare in punti prestabiliti misure di intensità di esposizione o di intensità di kerma in aria; nonché l'aspirazione

1 Il Centro è composto dal comandante provinciale dei VV.F. o da un suo delegato; un funzionario tecnico del Comando dei vigili del fuoco; un esperto ANPA (consulenza); un esperto ARPA (consulenza); un meteorologo dell'aeronautica militare; eventuali altri tecnici.

2 Le informazioni sugli automezzi sono state fornite dal Centro di Rilevamento Radioattivo e Chimico del Comando Provinciale dei vigili del Fuoco di Roma su filtro mediante gruppo di campionamento dell'aria (catena beta) e le successive misurazioni. Le misure iniziali vengono ripetute dopo un'ora. Tramite spettroscopia gamma si cerca di individuare il tipo di radionuclidi che costituiscono la contaminazione radioattiva. Possono inoltre essere prelevate **matrici ambientali** (acqua superficiale o di falda, campioni di terreno, campioni vegetali, latte, ecc.).

APPROFONDIMENTO

COMANDO PROVINCIALE DEI VIGILI DEL FUOCO DI ROMA CENTRO DI RILEVAMENTO RADIOATTIVO E CHIMICO ACT / NUC AUTOCARRO TRASPORTO NUCLEARE			VF14020
OPERATIVITÀ: COLONNA MOBILE CLASSIFICAZIONE: G.O.S. EQUIPAGGIO: 1 guida 3° grado 3 operatori specializzati			
CARATTERISTICHE		SHELTER PRESSURIZZATO Locale di decontaminazione con doccia e lavandino lavaocchi, disimpegno per la vestizione, laboratorio di misura. La pressurizzazione è ottenuta mediante un sistema di areazione con un elettroventilatore centrifugo con prefiltro e filtro a carbone attivo; è presente un sistema di campionamento dell'aria in uscita dalla batteria di filtri per il controllo dell'eventuale contaminazione residua. In emergenza sono disponibili due gruppi (3+2) di cilindri di aria compressa da 40 (50) litri a 200 bar ciascuno, a cui sono asservite separatamente la cabina e lo shelter.	
MECCANICA FIAT OM 100 PAC 26 4x4 ANNO DI FABBRICAZIONE 1992 TELAIO MOTORE DIESEL 4 TEMPI CILINDRI 6 DIAMETRO 137 mm CORSA 156 mm CILINDRATA TOTALE 13.798 cm ³ VELOCITÀ MAX 72 Km/h		SERBATOIO D'ACQUA: 312 l sul tetto GRUPPI ELETTROGENI: due da 6 kVA a benzina GRUPPO INVERTER: 2 kVA con batterie da 96 V tot	
RUOTE N° 6 CON PNEUMATICI 1200-20PR18 1° ASSE ANT. N° 2 MOTORI N° 2 2° ASSE POST. N° 4 MOTORI N° 4		IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO: a circuito chiuso (con acqua e freon R22). Il compressore esterno refrigera l'unità interna con un sistema ad acqua per evitare che in caso di rottura delle tubazioni, venga immesso il freon nell'ambiente interno dello shelter.	
FRENI DI SERVIZIO PNEUMATICO DI SOCCORSO PNEUMATICO DI STAZIONAMENTO MECCANICO		STRUMENTAZIONE: ANALIZZATORE MULTICANALE SILENA da 2010 canali 1900 CATO CON RIVELATORE A SCINTILLAZIONE NH	
TRASMISSIONE MECCANICA, MEDIANTE ALBERO MUNITO DI GIUNTI CARDANICI RAPPORTO AL PONTE 1:5,67		CATENA DI CONTEGGIO PER RADIAZIONI ALFA con RIVELATORE A SCINTILLAZIONE ZnS	
CARROZZERIA FRANZ-ISELLA TIPO FURGONE AD USO SPECIALE PER EMERGENZA NUCLEARE		CATENA DI CONTEGGIO PER RADIAZIONI BETA con RIVELATORE A SCINTILLAZIONE tipo plastico	
DIMENSIONI LUNGHEZZA MAX 7,950 m LARGHEZZA MAX 2,500 m ALTEZZA MAX 4,000 m PASSO 4,600 m CARREGGIATA ANT. 1,927 m CARREGGIATA POST. 1,809 m		Schemi in piombo per misura Aspiratore a palette di grafite con portafiltri	
PESI P.T.T. 16.000 kg TARA PORTATA P. RIMORCHIABILE 25.000 kg			
TPOLOGIA: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> logistico <input checked="" type="checkbox"/> nucleare <input type="checkbox"/> chimico <input type="checkbox"/> NBC <input type="checkbox"/>			

Fig.149

APPROFONDIMENTO

COMANDO PROVINCIALE DEI VIGILI DEL FUOCO DI ROMA CENTRI DI RILEVAMENTO RADIAATTIVO E CHIMICO CRRC / NBC CARRO RILEVAMENTO E ADATTI PER CHIMICO RILEVAMENTO RADIAATTIVO		
OPERATIVITÀ: COLONNA MOBILE CLASSIFICAZIONE: G.O.S. EQUIPAGGIO: 1 guida 3° grado specializzato 2 operatori specializzati	VF19802	
CARATTERISTICHE MECCANICA RENAULT S.180/75 MIDR.060 220V ANNO DI FABBRICAZIONE 1994 TELAIO MOTORE DIESEL 4 TEMPI CILINDRI 6 DIAMETRO 106 mm CORSA 126 mm CILINDRATA TOTALE 6.174 cm ³ VELOCITÀ MAX 112 Km/h RUOTE N° 6 CON PNEUMATICI 215/75R17.5 1° ASSE ANT. N° 2 2° ASSE POST. N° 4 ROTRICI N° 4 FREMI DISERVIZIO IDROPNEUMATICO DISOCCORSO IDROPNEUMATICO DISTAZIONAMENTO MECCANICO a nolle a comando pneumatico TRASMISSIONE MECCANICA, MEDIANTE ALBERO MUNITO DI GIUNTI CARDANICI RAPPORTO AL PONTE 1:3,15 CARROZZERIA RAVASINI - TECNO.EL TIPO FURGONE AD USO SPECIALE PER RILEVAMENTO CHIMICO, RADIAATTIVO E NBC DIMENSIONI LUNGHEZZA MAX 8,500 m LARGHEZZA MAX 2,300 m ALTEZZA MAX 3,900 m PASSO 3,250 m CARREGGIATA ANT. 1,600 m CARREGGIATA POST. 1,694 m PESI PTT 9.000 kg TARA PORTATA P. RIMORCHIABILE		IL CRRC/NBC È IL MEZZO DI SOCCORSO DI PRIMO INTERVENTO PER TUTTI GLI ASPETTI RELATIVI AI PERICOLI DERIVANTI DA SOSTANZE CHIMICHE PERICOLOSE, NOCIVE O INQUINANTI NONCHÉ DA RADIOSOTOPPI. IL CRRC/NBC È STRUTTURATO PER OPERARE IN PRESENZA DI AGGRESSIVI NON CONVENZIONALI (CONTRASTO A SITUAZIONI NBC). NBC FIALE COLORIMETRICHE PER AGGRESSIVI NON CONVENZIONALI; RILEVATORE DI AGENTI CHIMICI ENVIRONICS QY M 90 (AGENTI NERVINI, CHIMICI E AGENTI BLOCCANTI L'ATTIVITÀ EMOGLOBINICA). CHIMICO FIALE COLORIMETRICHE A LETTURA DIRETTA E A DIFFUSIONE; STRUMENTI MULTIAS CON SENSORI ELETTROCHIMICI DEDICATI, ESPLOSIMETRI, METANOMETRI, CERCAFUOCHI, TURAPALLE, ATTREZZATURE ANTISCINTILLA NUCLEARE MULTICANALE SILENA mod. S/M 1000 CANALI CON RILEVATORE A SCINTILLAZIONE NaI E SCHERMO DI MISURA, SONDA PER IMMERSIONE (-50÷+150°C), RADIMETRI CAMPALI A LETTURA ANALOGICA (RS4 C, RA 141EF) E DIGITALE (RA 141 C), SONDE PER RADIAZIONI α, β, γ (SCINTILLATORE F 119 C gamma SCINTILLATORE SL 103 alpha, O.M. OF 142), INTENSIMETRO NR23 C CON SONDA RV 12, DOSIMETRIA TERMO LUMINESCENZA E DIGITALE, CATENA DI CONTEGGIO PER BETA TOTALI. INFRAROSSO TERMOCAMERA AGEMA 470 (-50÷+500°C) PIROMETRI MINOLTA LAND CICLOPS 33 (+1000°C) DPI INDUMENTI MONOUSO IN TYVEK, TYVEK F E TYVEK C TUTTE IN SOVRAPPRESSIONE CON AIR LINE; AUTORESPIRATORI A CICLO APERTO E A CICLO CHIUSO A LUNGA AUTONOMIA; MASCHERE A FILTRO CON FILTRI SPECIFICI PER POLVERI, IODIO E FUMI RADIOATTIVI; MASCHERE A FILTRO DI STANDARD NATO CON FILTRI PER DIFESA CIVILE, KIT DI AUTOPROTEZIONE DA AGGRESSIVI NON CONVENZIONALI.
TIPOLOGIA <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> logistico <input checked="" type="checkbox"/> nucleare <input type="checkbox"/> chimico <input checked="" type="checkbox"/> NBC <input type="checkbox"/>		

Fig. 150

10.7.3 Emergenza radiologica

Le valutazioni per stabilire se si è in una situazione di emergenza nucleare non sono semplici. Per capire se le persone esposte potranno superare la dose limite fissata a 1 mSv, bisogna definire la durata del rilascio, il tipo di radioisotopi presenti in aria, il pericolo di ingestione, ecc. La situazione sarà di preallarme o attenzione quando la dose a seguito dell'aumento della radioattività (complessiva, per esposizione interna ed esterna) può essere valutata come maggiore di 1 mSv ma inferiore o uguale a 5 mSv. Per una dose individuale valutabile come maggiore di 5 mSv scatta invece lo stato di allarme. La tabella riassume quanto detto.

Situazione normale	$H < 1 \text{ mSv}$
Situazione di attenzione	$1 \text{ mSv} \leq H \leq 5 \text{ mSv}$
Situazione di allarme	$H > 5 \text{ mSv}$

I criteri operativi sono indicati nella Circolare 8/8/73 riportata in allegato. Le fasi dell'emergenza radiologica si possono distinguere schematicamente nel modo seguente:

- una fase iniziale, immediatamente successiva al rilascio nell'atmosfera della nube radioattiva, in cui il rischio è determinato dall'inalazione di particelle radioattive trasportate dalla nube e dall'irraggiamento delle stesse;
- una fase intermedia, fino ad alcune settimane, in cui il rischio è associato all'irradiazione delle particelle depositate sul terreno, ingestione di cibo (in primo luogo latte e verdure) o acqua contaminati, inalazione di particelle sospese in aria;
- una fase finale, la cui durata può essere anche di molti anni, in cui il rischio è dovuto principalmente alla contaminazione di matrici ambientali e all'introduzione nella catena alimentare di radionuclidi. Le misure conseguenti sono essenzialmente di monitoraggio della nube, allontanamento di persone da una località, ricovero in luoghi chiusi meno esposti, informazione, controllo dei cibi, eventuali divieti nell'alimentazione, decontaminazione delle aree più esposte; e per le persone sottoposte alla maggiore irradiazione iodiofilassi, decontaminazione, e consigli di non procreare. Di seguito si riportano i livelli di intervento ed i valori di soglia previsti dal D.Lgs.

1 Nel caso delle squadre di soccorso che parteciparono allo spegnimento del reattore di Chernobyl, una delle misure che furono provate fu un'immediata trasfusione di sangue.

Livelli di intervento di emergenza per l'adozione di misure protettive, espressi in millisivert

TIPO DI INTERVENTO	
Riparo al chiuso	Da alcune unità ad alcune decine di dose efficace
Somministrazione di iodio stabile tiroide	Da alcune decine ad alcune centinaia di dose equivalente
Evacuazione	Da alcune decine ad alcune centinaia di dose efficace

Valori di soglia di dose proiettata in un intervallo di tempo inferiore a due giorni, espressi in gray che richiedono l'attuazione di provvedimenti

ORGANO O TESSUTO	DOSE PROIETTATA (Gy)
Corpo intero (midollo osseo)	1
Polmoni	6
Pelle	3
Tiroide	5
Cristallino	2
Gonadi	3
Feto	0,1

Per dose proiettata si intende la dose ricevuta da un individuo in un intervallo di tempo dall'inizio dell'incidente, da tutte le vie di esposizione, quando non vengono adottati interventi. E' da considerare necessaria l'adozione di provvedimenti nel caso in cui le dosi proiettate risultino superiori ai valori della tabella. I valori di soglia indicati sono quelli minimi ai quali cominciano a verificarsi effetti somatici deterministici.**1**