



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA CALABRIA**  
**FACOLTÀ DI SCIENZE M.F.N.**  
**CORSO DI LAUREA IN FISICA**

**TESINA**  
**DEL CORSO DI**  
**LABORATORIO DI FISICA DELLA MATERIA**

**STUDIO DELL'APPARATO PYLON AB-5**  
**PER MISURE DI RADON.**  
**MISURAZIONI DI RADON IN EDIFICI.**

**GLI STUDENTI**

*Bozzo Giacomo*  
*Matranga Ariosto*

*Valentino Francesco*

**IL DOCENTE**

*G. Falcone*

---

**ANNO ACCADEMICO 2000/2001**

## PREFAZIONE

Lo scopo di questo lavoro è quello di introdurci alle problematiche relative al gas Radon nell'ambiente, di rendere operativo un apparato di misura che consenta di misurare concentrazioni di Radon in ambienti chiusi (edifici, etc.) e di testare la calibrazione dello strumento.

Ringraziamo come gruppo di studenti:

- il prof. G. Falcone per la disponibilità e per aver messo a nostra disposizione, oltre che il laboratorio, una serie di servizi indispensabili per il lavoro;
- La dott.sa Adalisa Tallarico per la gentile collaborazione e l'aiuto .

# INDICE

1. RADIOATTIVITA' .....	5
1.1 LE TRASFORMAZIONI DEL NUCLEO .....	6
1.2 LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO .....	7
1.3 PASSAGGIO DI PARTICELLE NELLA MATERIA .....	8
1.3.1 Percorso residuo .....	9
1.4 TIPI DI DECADIMENTI.....	11
1.4.1 L'emissione di raggi gamma.....	11
1.4.2 Il decadimento beta.....	12
1.4.3 L'emissione di particelle alfa .....	14
1.5 ATTIVITA' .....	15
1.5.1 Equazioni di Bateman ed equilibrio radioattivo.....	15
2. GAS RADON.....	17
2.1 RADON IN EDIFICI .....	18
2.2 RADON=RISCHIO.....	22
3. RIVELATORI A SCINTILLAZIONE.....	26
3.1 SCINTILLAZIONE NEI CRISTALLI INORGANICI .....	27
3.2 CONVERSIONE DEL SEGNALE LUMINOSO IN ELETTRICO.....	29
3.3 SEGNALI DI RUMORE.....	36
4. DESCRIZIONE APPARATO DI MISURA .....	38
4.1 UNITA'PRINCIPALE AB-5 .....	39
4.1.1 Funzionamento dell'AB-5 .....	40
4.1.2 Descrizione del pannello frontale.....	41
4.1.3 Descrizione del pannello posteriore .....	42
4.1.4 Modi operativi dell'AB-5 .....	43
4.1.5 Impostazione generale dell'AB-5.....	45
4.1.6 Operazioni generali nel modo cont e radon .....	45
4.1.7 Raccolta e visualizzazione dati.....	47
5. CALIBRAZIONE DELLO STRUMENTO DI MISURA .....	50
5.1 ACCESSORIO CPRD: CARATTERISTICHE .....	50
5.2 CALIBRAZIONE.....	52

5.2.1	Scopo della calibrazione.....	53
5.2.2	Condizioni dell'utilizzo dell'apparato dopo la calibrazione .....	53
5.3	PROVA DI CALIBRAZIONE .....	56
5.3.1	Determinazione del punto di lavoro .....	56
5.4	SENSIBILITA' E RUMORE DI FONDO .....	62
6.	MISURAZIONI.....	64
6.1	PROCEDURA GENERALE PER EFFETTUARE MISURE .....	64
6.1.1	Accorgimenti .....	65
6.2	LE MISURE .....	65
6.3	CONCLUSIONI .....	68
	APPENDICE .....	69
	FATTORI DI CONVERSIONE.....	69
	BIBLIOGRAFIA.....	70

# 1. RADIOATTIVITA'

Con il termine RADIOATTIVITA' si intende l'emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo.

Risulta evidente che la scoperta della radioattività va di pari passo con la ricerca sulla struttura atomica e sulle caratteristiche nucleari.

Nel 1896 Henri Becquerel notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio. Questi composti dovevano emettere perciò radiazioni capaci di rilasciare energia all'interno delle lastre impressionandole. Nel 1899 Pierre Curie e sua moglie Marie riuscirono ad estrarre dal misterioso minerale la sostanza radioattiva responsabile dello strano fenomeno, che fu chiamata radio. Un anno dopo Ernest Rutherford identificò le radiazioni emesse dalle sostanze radioattive in emissioni alfa e beta, mentre Paul Villard individuò i raggi gamma. Rutherford osservò inoltre che gli atomi che emettono radiazioni si trasformano in atomi diversi, in altre parole dotati di proprietà chimiche diverse da quelle caratteristiche degli atomi di partenza. Molti esperimenti furono svolti negli anni successivi allo scopo di individuare la composizione dei tre tipi di radiazione. I loro risultati hanno portato a concludere che la radiazione alfa è costituita da nuclei di elio (due protoni e due neutroni), la radiazione beta da elettroni (o dalle loro antiparticelle, i positroni) mentre la radiazione gamma è una radiazione elettromagnetica (e quindi composta da fotoni) particolarmente energetica.

La struttura del nucleo divenne più chiara quando, nel 1932, James Chadwick scoprì il neutrone. Nel 1895 il fisico tedesco Wilhelm Conrad Roentgen, studiando l'effetto delle scariche elettriche nei gas rarefatti, scoprì radiazioni capaci di rendere fosforescente un pezzo di carta ricoperto di un sale di bario posto nelle vicinanze. Roentgen chiamò raggi X queste radiazioni di origine sconosciuta.

Si arrivò così all'ipotesi di Heisenberg che i nuclei atomici consistessero di protoni e di neutroni.

La conoscenza delle proprietà nucleari progredì notevolmente grazie ad esperimenti nel corso dei quali i nuclei venivano bombardati con particelle leggere (protoni, elettroni, particelle alfa ...). Grande importanza assunse anche lo studio della trasmutazione artificiale di una specie chimica in un'altra.

## 1.1 LE TRASFORMAZIONI DEL NUCLEO

Alla base delle emissioni radioattive c'è la tendenza di alcuni nuclei a portarsi verso configurazioni sempre più stabili. Così un nucleo che si trova in uno stato eccitato, avente in pratica energia superiore a quella dello stato fondamentale, si libera dell'energia in eccesso emettendo particelle alfa, beta, o fotoni gamma. La radioattività, oltre che naturale, può anche essere provocata artificialmente. Se, infatti, si "eccita" un nucleo bombardandolo con particelle come protoni o neutroni, esso tornerà, o si avvicinerà, allo stato fondamentale emettendo radiazioni.

La radioattività naturale si presenta in quasi tutti i nuclei aventi numero atomico  $Z$  compreso tra 81 e 92; essi si trasformano in nuclei più leggeri, le cui caratteristiche chimiche sono ben distinguibili da quelle dei nuclei iniziali.

Non è detto che un nucleo radioattivo decada direttamente in un nucleo stabile; può accadere che esso decada in un nucleo instabile a sua volta soggetto a decadimento radioattivo. Il processo in cascata continua finché non si giunge a un nucleo stabile. Si parla allora di serie radioattiva.

Gli elementi naturalmente radioattivi sono stati raggruppati in tre serie che prendono nome dai tre elementi che fungono da capostipite: la serie dell'uranio, la serie del torio, la serie dell'attinio. I capostipiti hanno vite medie molto lunghe (rispettivamente 6,5, 20 e 1,3 miliardi di anni) e decadono in elementi più leggeri; il processo di decadimento si arresta quando viene generato un isotopo stabile del piombo. Esiste anche la serie del nettunio che però contiene anche nuclei radioattivi non esistenti in natura ma generati in laboratorio (elementi transuranici); la serie termina in un isotopo stabile del bismuto.

I nuclei appartenenti a una stessa serie differiscono l'uno dall'altro per quattro nucleoni, poiché il decadimento che fa passare dall'uno all'altro corrisponde all'emissione di particelle alfa. In un numero limitato di casi può verificarsi anche il decadimento beta il quale,

trasformando un neutrone in un protone, non comporta il cambiamento del numero di massa A.

Gli isotopi instabili che decadono emettendo particelle alfa, beta o raggi gamma, sono detti radioisotopi; se ne conoscono circa un migliaio ma le loro vite medie e le difficoltà legate alla loro produzione fanno sì che solo un centinaio siano utilizzabili per applicazioni pratiche.

## 1.2 LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

La legge che descrive il decadimento radioattivo è di tipo esponenziale. Questa legge mostra come si riduce al passare del tempo il numero di nuclei di partenza a causa del loro decadimento:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dove N rappresenta il numero di atomi e  $\tau$  è la vita media. Dopo che è trascorso un tempo pari alla vita media, quasi i due terzi dei nuclei iniziali risultano aver subito il decadimento radioattivo. La vita media varia a seconda del nucleo considerato. Il suo valore è un chiaro indice della stabilità del nucleo cui si riferisce: una vita media breve è segno d'instabilità e quindi di predisposizione al decadimento radioattivo; i nuclei stabili invece vantano vite medie lunghissime.

Gli atomi che emettono spontaneamente radiazioni sono detti " **radionuclidi** ".

La legge del decadimento può essere espressa anche in quest'altro modo:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{T_{1/2}} \ln 2}$$

dove al posto di  $\tau$  compare il parametro  $T_{1/2}$  detto tempo **di dimezzamento** che corrisponde al tempo necessario perché si disintegri la metà dei nuclei contenuti in un campione radioattivo. I valori di  $T_{1/2}$  vanno da una frazione di secondo a miliardi di anni; ad esempio, per l'uranio-238 è  $4,5 \times 10^9$  anni, per il radion-226 è 1620 anni. Il rapporto fra  $T_{1/2}$  e  $\tau$  è espresso dalla relazione  $T_{1/2} = \tau \ln 2$ .

Nella tabella nella seguente pagina sono riportati i tempi di dimezzamento di alcuni isotopi.

Tempi di dimezzamento degli isotopi Radio, Carbonio e Uranio:

ISOTOPO	TEMPO DI DIMEZZAMENTO
Radio-223	11,7 giorni
Radio-224	3,64 giorni
Radio-225	14,8 giorni
Radio-226	1620 anni
Radio-228	6,7 anni
Cobalto-60	5,3 anni
Carbonio-14	5730 anni
Carbonio-15	2,4 secondi
Uranio-235	$7,1 \times 10^8$ anni
Uranio-238	$4,5 \times 10^9$ anni

### 1.3 PASSAGGIO DI PARTICELLE NELLA MATERIA

Le particelle cariche incontrando la materia possono trasferire la loro energia agli atomi o molecole, eccitandone gli elettroni. Se l'energia è sufficiente a sottrarre l'elettrone alle forze d'attrazione del nucleo si otterrà un atomo o molecola ionizzati. La perdita di energia per effetto di diffusione coulombiana delle particelle con gli elettroni degli atomi del mezzo, che la particella attraversa, è data con buona approssimazione dalla formula di Bethe-Block

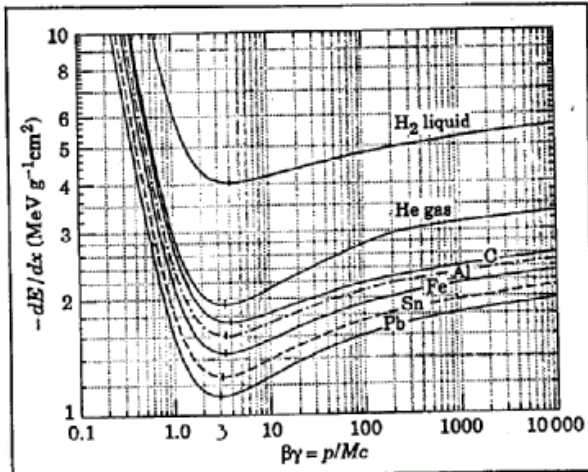
$$M \gg m_e \quad -\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 \beta^2 E_{\max}}{I} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \text{ (MeV/cm)}$$

$$M = m_e \quad -\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{\tau^2 (\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} \right) + F(\tau) - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \text{ (MeV/cm)}$$

dove

$r_e$	raggio classico dell'elettrone	$\beta$	velocità della particella incidente
$N_A$	numero di Avogadro	$E_{\max}$	energia max trasferita in un urto
$m_e$	massa dell'elettrone	$\gamma$	$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
$\rho$	densità del materiale	$ze$	carica della part. incidente
$Z$	numero atomico del materiale	$\delta$	correzione effetto densità
$A$	peso atomico	$C$	correzione per bassi $\beta$
$I$	pot. medio di ionizzazione del mezzo	$\tau$	en. cinetica dell' $e^\pm$ incidente/ $m_e c^2$
$F(\tau)$	assume espressioni diverse a seconda che la part. incidente sia un $e^-$ oppure un $e^+$		





Perdita di energia di una  
particella carica  
incidente in diversi  
materiali

La dipendenza delle proprietà del mezzo è racchiusa nei termini  $\rho$ ,  $Z/A$ , e  $I$ . La perdita di energia non dipende dalla massa della particella incidente ma solo dalla sua carica elettrica  $ze$  e dalla sua velocità  $\beta$ . Nelle figura in alto è riportato l'andamento del potere frenante  $dE/dx$  : si nota come esso diminuisce all'aumentare dell'energia sino ad un valore minimo (minimo di ionizzazione: mip), dopodichè risale lentamente a causa di effetti relativistici. Tale risalita relativistica si arresta dopo un po' per effetto della polarizzazione del materiale attraversato. Se il mezzo è solido questo effetto risulta particolarmente evidente (effetto densità).

Esistono altri tipi di perdita di energia di particelle attraverso la materia (effetto Cherenkov, radiazione di transizione, Breemstralung, diffusione con i nuclei) ma la perdita di energia per diffusione particella-elettrone predomina rispetto alle altre.

### 1.3.1 PERCORSO RESIDUO

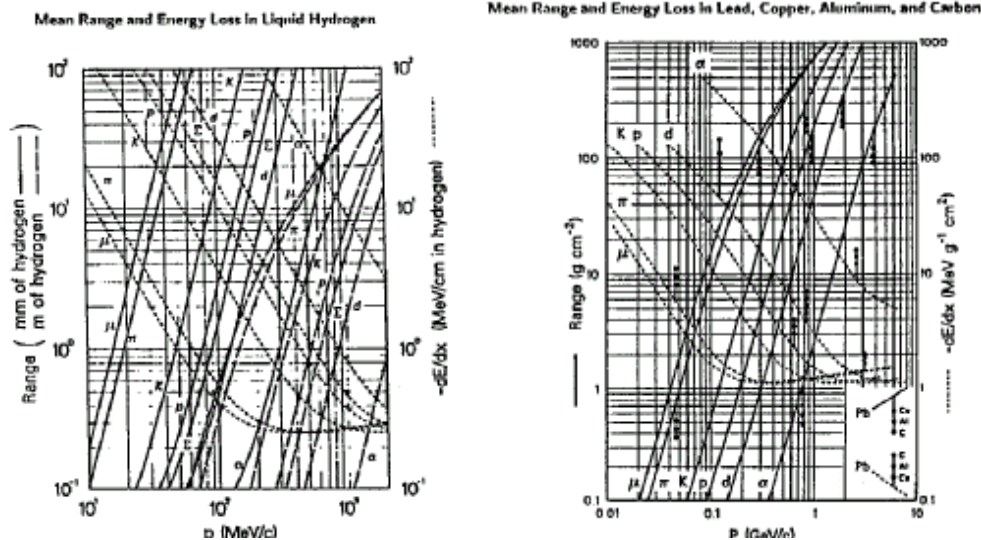
Immaginiamo di far attraversare un fascio di particelle di un determinato tipo e della desiderata energia attraverso differenti spessori di determinati materiali. Misuriamo il rapporto tra il numero di particelle trasmesse e quelle incidenti. La perdita di energia avviene attraverso un numero discreto di collisioni. Le fluttuazioni sul numero e sull'entità della perdita di energia per collisione fanno sì che due particelle identiche della stessa energia si arrestano nel materiale dopo aver percorso distanze differenti. Questo fenomeno è noto con il nome di **straggling**. Da un punto di vista teorico si potrebbe essere tentati di calcolare il **range medio** di una particella di energia  $T_0$  integrando l'inverso della formula

del potere frenante:  $S(T_0) = \int_0^{T_0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$ . Questa equazione, però, non tiene conto né dello scattering coulombiano multiplo, che produce un allungamento del percorso della particella, né della imprecisione delle previsioni sulla energia persa a fine percorso. Il primo fa sì che la particella proceda lungo un percorso a zig zag chiaramente più lungo di quello relativo al range medio testè definito. Per le particelle pesanti la diffusione multipla è piccola e l'effetto sul range trascurabile. Il secondo invece è molto più importante e per la sua stima si usa introdurre nella formula un termine empirico,  $R_0(T_{\min})$ , che tiene conto del comportamento del  $dE/dx$  a basse energie.

La formula semiempirica del range è quindi:

$$R(T_0) = R_0(T_{\min}) + \int_{T_{\min}}^{T_0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

dove  $T_{\min}$  è la minima energia alla quale la formula del  $dE/dx$  è valida. Nelle figure seguenti è riportato il range e il potere frenante per diverse particelle pesanti in vari materiali.



(a) range e perdita di energia di  $\mu, \pi, K, p, \Sigma$  e  $\alpha$  in  $H_2$  liquido

(b) range e perdita di energia di  $\mu, \pi, K, p, \Sigma$  e  $\alpha$  in Pb, Cu, Al e C.

## 1.4 TIPI DI DECADIMENTI

Molti nuclei sono instabili poiché la loro energia di legame non è sufficiente a tenere insieme i nucleoni che li costituiscono. Insorgono allora processi spontanei di trasmutazione nel corso dei quali i nuclei instabili si trasformano in nuclei più stabili. Questi processi vengono anche chiamati decadimenti radioattivi perché sono accompagnati dall'emissione di radiazioni di diversa natura: raggi gamma, particelle alfa e particelle beta.

Com'è noto, la radioattività è una normale componente dell'ambiente naturale per cui l'uomo è stato costantemente esposto alle radiazioni d'origine naturale fin dal suo apparire sulla terra e queste sono rimaste l'unica fonte d'irradiazione fino a poco meno di un secolo fa.

Ancora adesso, nonostante il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e d'impianti radiogeni di vario genere, la radioattività naturale continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione ed è assai probabile che ciò continui a verificarsi anche in futuro.

Nella radioattività naturale si distinguono due componenti, una di origine terrestre e l'altra extra-terrestre. La prima è dovuta ai radionuclidi primordiali contenuti in varia quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (minerali, rocce) fin dalla sua formazione.

La seconda è costituita dai raggi cosmici, anche conosciuti come " Radiazione di fondo ".

I principali radionuclidi primordiali sono, il Potassio (K-40), il Rubidio (Rb-87), e gli elementi delle due serie radioattive dell'Uranio (U-238), e del Torio (Th-232). Generalmente s'ignora la serie dell'isotopo 235 dell'Uranio (U-235), data la modesta abbondanza relativa del capostipite, anche se ciò non sempre è giustificato in termini dosimetrici.

### 1.4.1 L'EMISSIONE DI RAGGI GAMMA

L'emissione di raggi gamma avviene in quasi tutti i nuclei instabili e di solito corrisponde all'eliminazione d'energia in eccesso: un nucleone può trovarsi per esempio in uno stato di alta energia avendo tuttavia libero uno stato di energia più bassa; il nucleone passa nello stato inferiore e contemporaneamente la differenza di energia è rilasciata sotto forma di fotone gamma, cioè di onda elettromagnetica (è evidente la forte analogia col processo di

emissione spontanea che si verifica con gli elettroni degli atomi – fluorescenza e fosforescenza).

*I raggi gamma*

Sorgente: nuclidi radioattivi

Energia: la loro energia è proporzionale alla frequenza: da ca.10 keV a 10 MeV

Potere penetrante: forte (100 volte maggiore dei raggi beta), qualche centimetro di piombo ne diminuisce l'intensità di un fattore 2.

Potere ionizzante: ionizzazione indiretta dell'aria per mezzo di elettroni.

Grado di pericolosità: sempre pericolosi anche se emessi da sorgente esterna al corpo umano.

### **1.4.2 IL DECADIMENTO BETA**

Il decadimento beta è uno dei fenomeni più importanti nella fisica nucleare. E' il più comune, e tutti gli elementi radioattivi hanno isotopi che decadono in questo modo, Corrisponde alla trasformazione di un neutrone in un protone oppure, e in tal caso si parla di decadimento beta inverso, alla trasformazione di un protone in un neutrone.

Quando un neutrone si trasforma in un protone, il decadimento è accompagnato dall'emissione di un elettrone e di un antineutrino (l'antiparticella del neutrino); la presenza dell'elettrone garantisce che la carica elettrica del sistema rimanga inalterata prima e dopo il processo, si parla in questo caso di decadimento "beta –".

Quando invece si ha la trasformazione di un protone in un neutrone, sono emessi un neutrino e un positrone (un elettrone di carica positiva), si ha allora decadimento "beta +".

Il decadimento beta all'interno di un nucleo atomico accade quando il nucleo stesso presenta un eccesso di neutroni o di protoni, eccesso che deve essere eliminato.

In precedenza si è fatto notare come il numero di protoni e neutroni sia essenziale per determinare la stabilità di una certa configurazione nucleare.

Le configurazioni privilegiate sono quelle che, nel diagramma Z-N, si dispongono lungo la curva di stabilità. Se un nucleo si trova sopra tale curva, significa che al suo interno c'è un eccesso di neutroni. S'innescano allora un decadimento beta: uno dei neutroni del nucleo diviene un protone e contemporaneamente avviene l'emissione di un elettrone e di un neutrino. Così, il nucleo ha un protone in più e un neutrone in meno rispetto al nucleo di

partenza. Il trovarsi al di sotto della curva di stabilità indica invece che il nucleo contiene un eccesso di protoni.

Il decadimento beta inverso provvede alla loro "eliminazione": essi sono trasformati in neutroni mentre sono emessi positroni e neutrini.

Dunque, il decadimento beta avvicina il nucleo alla curva di stabilità. Il processo lascia invariato il numero di massa  $A$ , ma cambia  $Z$  ( aumenta di un'unità nel decadimento "beta -", diminuisce di un'unità nel decadimento "beta +").

Il decadimento beta è descritto dalle interazioni deboli e i protoni si trasformano in neutroni solo quando sono all'interno di nuclei: non è mai stato osservato il decadimento beta di protoni liberi. Questo comportamento dei protoni è legato alla loro massa. Quando una particella decade lo fa sempre trasformandosi in una particella più leggera. Per esempio, i neutroni decadono in protoni. I protoni però non hanno particelle più leggere in cui decadere. All'interno dei nuclei invece la presenza dell'energia di legame altera, anche se di pochissimo, i valori delle masse dei nucleoni. Può accadere così che un protone si trasformi in un neutrone.

### Raggi beta

Flusso di particelle di elettroni (beta -, negativi) e di positroni (beta +, elettroni positivi) emessi dal nucleo in disintegrazione. Alcune di queste particelle aventi alta velocità interagiscono con la materia, con conseguente emissione di raggi  $X$  (naturali).

Sorgente: nuclidi radioattivi

Energia: da qualche keV a molti MeV, ma di rado superiore ai 4 MeV.

Velocità: da 150.000 km/s a "c" (velocità della luce)

Potere penetrante: debole (100 volte minore dei raggi gamma e 100 volte maggiore dei raggi alfa), non superano una barriera dello spessore di 5 mm. d'alluminio o 2,5 cm di legno, inoltre non penetrano per oltre un centimetro nella pelle. Con un'energia di 3 MeV una particella beta percorre nell'aria circa un metro.

Potere ionizzante: molto basso, 4 coppie di ioni per millimetro con energia di 3 MeV.

Grado di pericolosità: il limitato potere penetrante fa sì che la loro pericolosità sia limitata se emesse da una sorgente esterna al corpo; sono dannose se la sorgente è interna.

### 1.4.3 L'EMISSIONE DI PARTICELLE ALFA

L'emissione di particelle alfa da parte del nucleo può avvenire grazie ad un processo caratteristico della fisica quantistica detto effetto tunnel: i due protoni e i due neutroni riescono in pratica a sfuggire pur possedendo una quantità d'energia insufficiente a rompere i legami nucleari. Questo fenomeno è perfettamente spiegato dalla meccanica quantistica ed è importante specialmente per i nuclei con numero atomico  $Z$  maggiore di 82 (piombo). In seguito a questo decadimento si ha una diminuzione di  $Z$  di 2 unità o di  $A$  di 4 unità.

#### Raggi alfa

Particelle costituite da nuclei di Elio (2 neutroni e 2 protoni) che hanno una doppia carica positiva.

Sorgente: nuclidi radioattivi

Energia: raramente inferiore ai 4 MeV.

Velocità: da 15.000 a 20.000 km/s

Potere penetrante: molto debole (100 volte minore dei raggi beta), non oltrepassano un foglio di carta, una lamina di alluminio dello spessore di 50 micron o lo strato basale dell'epidermide; nell'aria se possiedono un'energia di 3 MeV percorrono dai 2 agli 8 centimetri. Con un'energia di almeno 7,5 MeV possono penetrare nella pelle.

Potere ionizzante: molto elevato, (1000 volte maggiore dei raggi beta), con un'energia di 3 MeV producono 4000 coppie di ioni per millimetro.

Grado di pericolosità: solo se emesse da una sorgente interna al corpo umano, possono creare gravi danni in conseguenza dell'elevato potere ionizzante.

Altra fonte di radiazioni ionizzanti sono i raggi cosmici; con questo nome s'identificano fenomeni di varia natura (nuclei atomici, elettroni, positroni, raggi gamma, sciame fotoni-elettroni) e risulta abbastanza facile intuire che la loro sorgente è di origine extraterrestre.

La loro energia è molto elevata, dell'ordine di molte migliaia di MeV (da 108 a 1020 MeV), con elevatissima velocità, prossima alla velocità della luce; hanno un forte potere penetrante e ionizzante ma data la loro scarsa presenza hanno una pericolosità trascurabile.

## 1.5 ATTIVITA'

Con il termine "Attività" di una sostanza radioattiva si intende il numero di nuclei di questa sostanza che si disintegrano nell'unità di tempo:

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N(t)/\tau$$

una vecchia unità di misura dell'attività è il Curie (Ci), ora sostituita nel Sistema Internazionale (S.I.) dal Becquerel (Bq):

$$1 \text{ Ci} = 3.700.000 \text{ dis./sec.}$$

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dis./sec.}$$

La quantità di radioattività associata ad ogni tipo di materiale o ambiente è misurata in bequerels (Bq). 1Bq corrisponde a una disintegrazione al secondo. Una concentrazione di 100 Bq/m<sup>3</sup> significa quindi che 100 atomi si disintegrano ogni secondo in 1 m<sup>3</sup> di materiale o ambiente in questione.

### 1.5.1 EQUAZIONI DI BATEMAN ED EQUILIBRIO RADIOATTIVO

Se prendiamo una famiglia costituita da n nuclei radioattivi, la variazione del numero di nuclei per ogni elemento sarà data dalle seguenti equazioni:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{N_1}{\tau_1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_1}{\tau_1} - \frac{N_2}{\tau_2}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{N_2}{\tau_2} - \frac{N_3}{\tau_3}$$

.....

$$\frac{dN_n}{dt} = \frac{N_{n-1}}{\tau_{n-1}} - \frac{N_n}{\tau_n}$$

Se applichiamo a queste equazioni la condizione di equilibrio  $\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \dots = \frac{dN_n}{dt} = 0$

Otteniamo:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_1}{\tau_1} = 0$$

$$\frac{N_1}{\tau_1} = \frac{N_2}{\tau_2}$$

$$\frac{N_2}{\tau_2} = \frac{N_3}{\tau_3}$$

.....

$$\frac{N_{n-1}}{\tau_{n-1}} = \frac{N_n}{\tau_n}$$

dalla prima di queste equazioni si ottiene  $\frac{dN_1}{dt} = 0$ , ovvero il capostipite della famiglia risulta

stabile. Questo risultato non può essere vero altrimenti non avremo alcun discendente del capostipite e nessuna famiglia radioattiva. Perciò possiamo affermare che l'equilibrio non può mai realizzarsi esattamente.

Nel caso in cui la vita media del capostipite è molto lunga paragonata con quella di tutti i suoi discendenti allora  $N_1$  si può considerare praticamente costante e

$$\frac{1}{\tau_1} \approx \frac{1}{\tau_2} \approx \frac{1}{\tau_3} \approx \dots \approx \frac{1}{\tau_n}$$

Questa approssimazione viene detta equilibrio radioattivo approssimato (o condizione di equilibrio secolare). Si ha in tale condizione che l'attività del capostipite della famiglia coincide con l'attività dei discendenti della famiglia ovvero

$$\frac{N_1}{\tau_1} = \frac{N_2}{\tau_2} = \frac{N_3}{\tau_3} = \dots = \frac{N_n}{\tau_n}$$



## 2. GAS RADON

Il radon(Rn-222) è un gas radioattivo naturale, inodore, insapore ed incolore; esso deriva dal decadimento radioattivo naturale dell'uranio. Quest'ultimo è presente in quantità più o meno elevate in ogni tipo di suolo o di roccia. Inodore, invisibile, il Radon non può essere rivelato dai nostri sensi.

Il radon si forma in seguito alla disintegrazione dell'uranio, e la sua disintegrazione, a sua volta, dà luogo ad altri elementi radioattivi e infine al piombo, non radioattivo. In termini di classificazione chimica, il radon è uno dei gas rari, come neon, kripton e xeno. Il radon non reagisce con altri elementi chimici. Esso è il più pesante dei gas conosciuti (densità 9.72 g/l a 0°C, 8 volte più denso dell'aria).

Il radon diffonde nell'aria dal suolo e, a volte, dall'acqua (nella quale può disciogliersi). In spazi aperti, è diluito dalle correnti d'aria e raggiunge solo basse concentrazioni. Al contrario, in un ambiente chiuso, come può essere quello di un'abitazione, il radon può accumularsi e raggiungere alte concentrazioni.

Il Radon e' un gas radioattivo incolore estremamente volatile prodotto dal decadimento di tre nuclidi capostipiti che danno luogo a tre diverse famiglie radioattive; essi sono il Thorio 232, l'Uranio 235 e l'Uranio 238. Nella tabella seguente e' riportata la sequenza del decadimento del nuclide più abbondante in natura e cioè l'Uranio 238 responsabile della produzione dell'isotopo Radon 222. Il thorio 232 e l'uranio 235 producono invece rispettivamente il Rn 220 e Rn 219.

### Schema di Produzione del Radon 222 - Famiglia dell'Uranio

Isotopo	Radiazione	Emivita $\tau$	Costante di decadimento	Energia alfa
Uranio 238	Alfa	$4.5 \times 10^9$ anni	*****	*****
Torio 234	Beta	24.1 giorni	*****	*****
Protoattinio 234	Beta	1.2 minuti	*****	*****
Uranio 234	Alfa	$2.5 \times 10^5$ anni	*****	*****
Torio 230	Alfa	$7.5 \times 10^4$ anni	*****	*****
Radio 226	Alfa	1600 anni	$0.000427 \text{ anni}^{-1}$	4.77 MeV
Radon 222	Alfa	3.8 giorni	$0.0001258 \text{ min}^{-1}$	5.48 MeV
Polonio 218	Alfa	3 minuti	$0.227 \text{ min}^{-1}$	6.00 MeV
Piombo 214	beta	27 minuti	$0.0259 \text{ min}^{-1}$	0.7 MeV
Bismuto 214	beta	20 minuti	$0.0352 \text{ min}^{-1}$	3.3 MeV
Polonio 214	alfa	$1.5 \times 10^{-4}$ secondi	$4330 \text{ sec}^{-1}$	7.69 MeV
Piombo 210	beta	25 anni	$0.033 \text{ anni}^{-1}$	*****
Bismuto 210	beta	5 giorni	$0.139 \text{ giorni}^{-1}$	*****
Polonio 210	alfa	136 giorni	$0.0050 \text{ giorni}^{-1}$	5.31 MeV
Piombo 206		Stabile		

Decade in elementi radioattivi: due di questi, il Polonio-218 e il Polonio-214, emettono particelle alfa. Questi elementi possono fissarsi alle particelle atmosferiche ed essere inalati causando danni al tessuto polmonare.

## 2.1 RADON IN EDIFICI

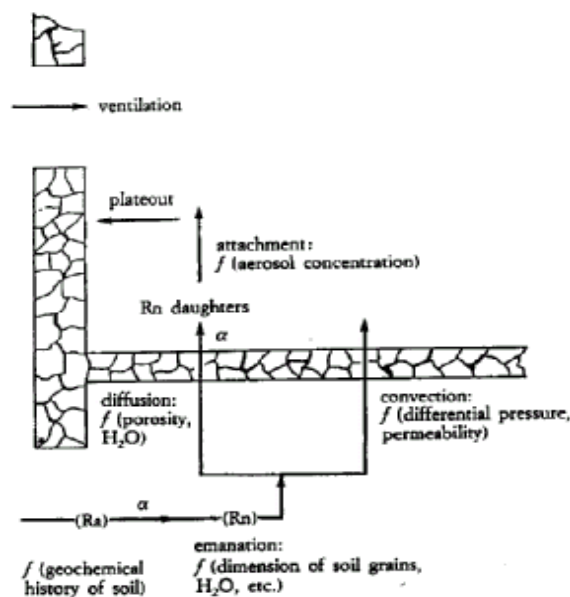
Il gas radon viene rilasciato durante il decadimento di materiale radioattivo presente nel terreno. I materiali radioattivi non sono concentrati in alcuni punti precisi della crosta terrestre ma sono presenti in quantità e concentrazioni variabili da zona a zona.

L'uranio è uno dei più antichi elementi naturali esistenti sulla terra ed è distribuito ubiquitariamente sulla crosta terrestre, benché la sua concentrazione sia diversa da luogo a luogo.

In generale, le rocce ignee contengono U-238, che ha un tempo di dimezzamento di 4,51 miliardi di anni, in concentrazioni più elevate che negli altri tipi di roccia

Il Radon viene generato continuamente da alcune rocce della crosta terrestre ed in particolar modo da Lave, tufi, pozzolane, alcuni graniti etc. Sebbene sia lecito immaginare che le concentrazioni di Radon siano maggiori nei materiali di origine vulcanica spesso si riscontrano elevati tenori di radionuclidi anche nelle rocce sedimentarie come marmi, marne, flysh etc. L'acqua sotterranea, i gas naturali, il carbone e gli oceani sono altre fonti minori di radiazioni. La concentrazione di radon, quindi, proviene sia dai materiali da costruzione, sia dal sottosuolo dove aumenta progressivamente quanto più secco è il terreno. Nei terreni aridi, sono state trovate concentrazioni fino a 5 volte superiori rispetto a quelli impregnati d'acqua.

Parecchi suoli contengono naturalmente quantità variabili di uranio, che regola la quantità di radon rilasciata. Il radon diffonde attraverso i pori e le spaccature del suolo, trasportato dall'aria o dall'acqua (nella quale è solubile). Dato un certo contenuto di radon nel suolo, la quantità di gas rilasciata varia in dipendenza della permeabilità del suolo (densità, porosità, granulometria), del suo stato (secco, impregnato d'acqua, gelato o coperto di neve) e dalle condizioni meteorologiche (temperature del suolo e dell'aria, pressione barometrica, velocità e direzione del vento). In più, la concentrazione di radon decresce rapidamente con l'altitudine. La migrazione del Radon e la sua diffusione nelle case può essere descritta da equazioni nelle quali vengono prese in considerazione il trasporto per diffusione molecolare e la convezione forzata come la rimozione per decadimento radioattivo .



Schema semplificato del movimento degli atomi di Radon nel suolo e negli edifici.

Nella figura precedente sono riportati i vari parametri che influenzano il processo di diffusione degli atomi di Radon.

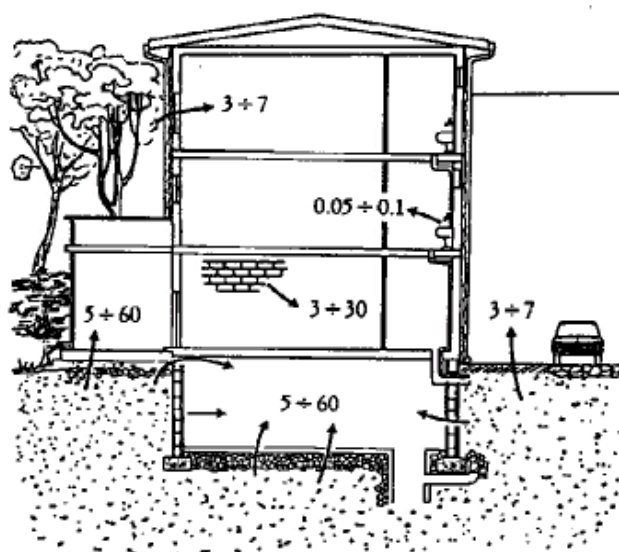
La via che generalmente percorre per giungere all'interno delle abitazioni e' quella che passa attraverso fessure e piccoli fori delle cantine e nei piani seminterrati. L'interazione tra edificio e sito, l'uso di particolari materiali da costruzione, le tipologie edilizie sono pertanto gli elementi più rilevanti ai fini della valutazione dell'influenza del Radon sulla qualità dell'aria interna delle abitazioni ed edifici in genere.

La differenza di temperatura presente tra ambiente esterno e l'interno di un edificio, fa sì che si instauri una piccola differenza di pressione atmosferica che attira l'aria e così il radon penetra nel suo interno, similmente a quanto avviene nel fenomeno di tiraggio delle canne fumarie (effetto camino). Anche la differenza del movimento dell'aria tra esterno e interno favorisce l'ingresso del gas (effetto vento).

Le più importanti vie attraverso le quali il gas può accedere alle abitazioni riguardano la struttura costruttiva dell'edificio e possono essere costituite da:

- fratture tra pavimento e pareti del piano terreno;
- fratture o crepe tra blocchi o mattoni nelle pareti degli edifici;
- fratture in generale dovute a cedimenti delle strutture;
- aperture causate da fenomeni di ritiro;
- corridoi e giroscali in comunicazione con scantinati;
- aperture attorno a tubazioni, sbocchi, cavi, ecc.;
- aperture attorno a bulloni di ancoraggio di attrezzature varie;
- impermeabilizzazione difettosa nelle zone di drenaggio;
- aperture intenzionali di drenaggio;
- pareti costruite con laterizi composti da scorie d'altoforno.

Il radon può passare attraverso qualsiasi apertura, anche se di piccole dimensioni, del pavimento o delle pareti ad esso solidali. Le aperture attorno alle condutture idrauliche possono veicolare il gas dal pianterreno ai piani superiori, ma i maggiori responsabili di questo fenomeno restano i punti di congiunzione tra muri e piani.



Valori medi di concentrazione interna in  $\text{Bq/m}^3$  di Radon emanato dal suolo, dai materiali di costruzione, dall'acqua o provenienti dall'esterno.

All'esterno, dove è diluito nell'aria in piccole concentrazioni, il Radon non pone particolari problemi, mentre all'interno delle abitazioni si può accumulare fino a raggiungere livelli significativi e dannosi per la salute. La sua concentrazione all'interno delle abitazioni dipende essenzialmente da come è costruito l'edificio e dalla concentrazione di Radon nel suolo sottostante. E' infatti la composizione e la matrice del suolo sotto e attorno alla casa a determinare il livello di Radon e la maniera con cui il Radon migra all'interno. E' stato inoltre provato che un'altra fonte importante di emissione di radon attraverso la quale esso può entrare nelle abitazioni è costituita dall'acqua potabile proveniente dal sottosuolo o da sorgenti, nella quale esso si trova naturalmente disciolto.

Poiché la concentrazione del radon all'aria aperta è bassa e in media le persone in Europa trascorrono la maggior parte del loro tempo in casa, il rischi per la salute pubblica dovuto al radon è essenzialmente correlato all'esposizione a questo gas all'interno delle abitazioni.

La maggior parte del radon presente in una casa proviene dal suolo sul quale essa è costruita. Se il basamento ha un pavimento di fango, il radon può penetrare facilmente. Se il pavimento è di cemento, il radon penetra attraverso le spaccature che si formano con il tempo, lungo le tubature o attraverso le giunture tra i muri. Il radon può anche provenire - in misura minore - dai muri, se essi sono stati edificati utilizzando materiali radioattivi (tufi vulcanici, per esempio) o dai rubinetti, se l'acqua contiene del radon disciolto.

Per un dato terreno, e indipendentemente dal tempo, la concentrazione finale di radon in una casa è quindi dipendente dal tipo di costruzione. Dipende anche, in larga misura, dalla

ventilazione, sia passiva (cattivo isolamento) che attiva (aprire le finestre a intervalli lunghi o brevi, per esempio) e dalla deposizione (come vedremo in seguito).

Il ruolo ricoperto dalle condizioni meteorologiche (vento, pressione barometrica, umidità) spiega non solo le variazioni stagionali della concentrazione di radon in una data casa, ma anche le differenze osservate tra i livelli diurni e notturni.

## **2.2 RADON = RISCHIO**

Alcuni studi nell'ultimo decennio hanno dimostrato che l'inalazione di Radon ad alte concentrazioni aumenta di molto il rischio di tumore polmonare.

I risultati di tali studi supportano l'opinione che, in alcune regioni europee, il Radon può essere la seconda causa in ordine di importanza, di cancro ai polmoni. Infatti, anch'esso emette radiazioni e si trasforma in altri elementi. Questi ultimi sono definiti "prodotti di decadimento" o "figli" del Radon, sono a loro volta radioattivi ed emettono ancora radiazioni. I prodotti di decadimento, che si depositano in parte sul pulviscolo presente nell'aria, quando vengono respirati si fissano all'interno dell'apparato respiratorio (bronchi e polmoni). Le radiazioni che emettono possono danneggiare le cellule dando inizio, in alcuni casi, ad un processo cancerogeno proprio a carico dell'apparato respiratorio. Il Polonio-214 e il Polonio-218, prodotti di decadimento del Radon, se inalati possono venire intrappolati nei bronchi e nei polmoni. Durante la loro permanenza all'interno del corpo umano, decadono cedendo la loro energia alle pareti del tessuto circostante, provocando dei danni al tessuto polmonare che possono portare all'insorgenza di un tumore. In precedente, nel sedicesimo secolo, Paracelso aveva notato l'alta mortalità dovuta a malattie polmonari tra i lavoratori delle miniere d'argento nella regione di Schneeberg in Sassonia (Germania). L'incidenza di questa malattia, in seguito conosciuta come "malattia di Schneeberg", aumentò nei secoli diciassettesimo e diciottesimo, quando l'attività nelle miniere di argento, rame e cobalto si intensificò. Questa malattia fu riconosciuta come cancro ai polmoni nel 1879.

Misure effettuate nel 1901 nelle miniere di Schneeberg rilevarono un'alta concentrazione di radon. Come risultato, fu presto lanciata l'ipotesi di un rapporto causa-effetto tra alti livelli di radon e cancro ai polmoni. Questa ipotesi fu rafforzata da più accurate misure del radon

compiute nel 1902 nella miniera di Schneeberg e in altre, in particolare quelle di Jachymov in Boemia, da dove provenivano i minerali usati da Marie Curie. Nondimeno, questi dati non bastarono a convincere tutti, e alcuni scienziati ancora attribuiscono questi tumori ai polmoni ad altri fattori.

L'attività nelle miniere di uranio fu intensificata dal 1940, ma i livelli di radon furono misurati regolarmente dal 1950.

Esperimenti su animali compiuti dal 1951 dimostrarono la potenziale carcinogenità del radon per i polmoni delle specie testate. Rilevamenti epidemiologici tra i minatori di uranio, dalla metà degli anni sessanta, hanno infine confermato questo potenziale sull'uomo. Nel 1967 il Congresso Federale per la Ricerca degli Stati Uniti ha proposto delle raccomandazioni per controllare i rischi correlati alle radiazioni in miniera. Nonostante non ci fossero più dubbi sulla realtà del pericolo ( l'Organizzazione Mondiale per la Salute confermò ciò nel 1988), fu ancora necessario quantificare il rischio in termini di intensità di esposizione, per definire appropriati livelli di protezione. A tal fine, numerosi rilevamenti epidemiologici sono stati effettuati negli anni '80 in varie nazioni, non solo tra lavoratori di miniere di uranio, ma anche di stagno e di ferro. Tali rilevamenti portarono a conclusioni convergenti. Tuttavia, alcune questioni (quali la rispettiva influenza della durata e dell'intensità dell'esposizione, l'influenza dell'età e precise quantificazioni del rischio), non sono ancora state risolte e richiedono ulteriori studi. Nonostante il premio Nobel per la fisica Ernest Rutherford aveva fatto notare sin dal 1907 che ognuno inala del radon ogni giorno, misure di radon non furono effettuate nelle case prima del 1956 (in Svezia). L'alto livello di radon rilevato in alcune case riscosse poco interesse in campo internazionale, perché il problema fu considerato esclusivamente locale. Soltanto 20 anni dopo si iniziarono studi sistematici su larga scala in numerose nazioni, che mostrarono che l'esposizione era generale e si potevano raggiungere livelli molto alti, comparabili a quelli delle miniere. La Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) sottolineò la vastità del problema per la salute pubblica e formulò specifiche raccomandazioni sulla pubblicazione numero 65 del 1993.

Soltanto negli ultimi 10 anni abbiamo potuto affermare che il radon può essere alla base dei più grandi problemi di salute pubblica. Le autorità locali, sostenute dalle autorità responsabili della salute pubblica, devono valutare l'entità del problema alla luce

dell'architettura locale e delle condizioni geologiche e aiutare a realizzare misure preventive per ridurre il rischio.

Sono state raggiunte conclusioni convergenti: il radon senza dubbio aumenta il rischio di tumore ai polmoni nei minatori. Inoltre, misurando i livelli di esposizione raggiunti da questi lavoratori, è stato possibile stimare in che misura il rischio di tumore ai polmoni aumenta con l'esposizione. Anche qui i vari studi approdarono a risultati molto simili.

E' stato largamente dimostrato che il fumo del tabacco è responsabile della gran parte dei tumori ai polmoni negli uomini e nelle donne. Studi sugli effetti combinati dell'esposizione al radon e al fumo delle sigarette mostrano che l'effetto totale di tali esposizioni è molto maggiore della somma dei due effetti. In altre parole il fumo aumenta considerevolmente il rischio di tumore ai polmoni correlato al radon, e viceversa. In più, il radon da solo è la seconda causa di cancro al polmone dopo il tabacco.

Per valutare l'entità del problema, sono state effettuate misure di livelli di radon nelle case in quasi tutti i Paesi europei negli ultimi 10 anni. E' stato rilevato che un basso livello medio nazionale non esclude l'esistenza di aree limitate ad alta concentrazione di radon. In molti casi la Commissione Europea ha appoggiato la realizzazione di queste campagne.

In ambito Nazionale l'ENEA ha svolto una serie di ricerche in alcune zone di Roma e dell'Alto Lazio che evidenziano una presenza di Radon molto variabile tra i 100 e 400 Bq/m<sup>3</sup> (Bequerel al metro cubo) con punte di 1000 ed oltre Bq/m<sup>3</sup> contro una media nazionale di circa 80 Bq/m<sup>3</sup>.

Risk evaluation of the lung cancer risk among populations exposed to radon daughters		
	lung cancers/10 <sup>6</sup> persons WLM	
UNSCEAR (1977)	200-450	Stime di rischio riportate da diversi enti di ricerca
BEIR III (1980)	730	
ICRP (1981)	150-450	
AECB (1982)	600	
NCRP (1984)	130	
BEIR IV (1987)	350	
ICRP (1987)	170	
1 WLM = 6.3 · 10 <sup>3</sup> Bq · h/m <sup>3</sup> (EEC)		

Nella tabella soprastante sono indicati le stime di rischio determinate da differenti enti di ricerca. Considerato che indifferenti modelli si basano sull'uso di parametri diversi i valori



riportati sono pressoché in accordo fra loro. Infatti i modelli sono stati applicati a campioni di popolazione con diverse caratteristiche. Le stime di rischio sono espresse in numero di cancro polmonari per milioni di persone esposte a 1 WLM. 1 WLM (Working Level Month) è un'unità di esposizione cumulativa, uguale a  $1\text{WL} \times 170\text{ h}$ , dove 1 WL corrisponde alla concentrazione di energia potenziale delle particelle alfa emesse dai prodotti di decadimento del Rn in aria, i quali sono in equilibrio radioattivo con l'attività del Rn, la cui concentrazione è  $3700\text{ Bq/m}^3$ . Facendo delle ipotesi sul valore del fattore di equilibrio nelle abitazioni e sul tempo di residenza della popolazione all'interno di queste, 1 WLM corrisponde all'esposizione per un anno ad una concentrazione di gas Radon dell'ordine dei  $180\text{ Bq/m}^3$ .

Ci sono ancora aree di incertezza:

- L'influenza dell'età sul tempo di esposizione: sono forse le persone più giovani più sensibili delle più anziane?
- La rispettiva influenza della durata e dell'intensità dell'esposizione non è ancora chiaramente quantificata. Non è certo che essere esposti a  $400\text{ Bq/m}^3$  per 10 anni comporti gli stessi rischi che essere esposti a  $4000\text{ Bq/m}^3$  per un anno.

I risultati degli studi in corso potrebbero, tra pochi anni, fornire una risposta ad alcune di queste domande. Nondimeno, possiamo ora concludere, sulla base delle conoscenze attuali, che l'esposizione al radon nelle case pone un considerevole problema per la salute pubblica.

### 3. RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

I materiali in grado di emettere luce in tempi brevi in quantità proporzionale all'energia liberata al loro interno da una particella ionizzante prendono il nome di scintillatori.

La luce viene emessa a seguito della diseccitazione di atomi (molecole) eccitati dalla interazione elettromagnetica con la particella ionizzante.

Una sostanza può essere classificata come scintillatore se sono verificate le seguenti condizioni:

- *Risposta immediata*: la luce deve essere emessa in  $t < 1\mu\text{s}$  (fluorescenza);
- *Diseccitazione prevalentemente radiativa*: l'energia ricevuta dalla sostanza deve essere rimessa sotto forma di fotoni nel visibile;
- *Trasparente alla luce di scintillazione*: i fotoni prodotti devono poter viaggiare nella sostanza indisturbati sino a che non raggiungono la zona di raccolta.

I materiali scintillanti sono usualmente suddivisi in **organici** e **inorganici** per il diverso processo fisico che è alla base della produzione della luce di fluorescenza. I materiali principalmente usati per gli scintillatori inorganici ed organici sono riportati nelle due seguenti tabelle:

#### SCINTILLATORI INORGANICI

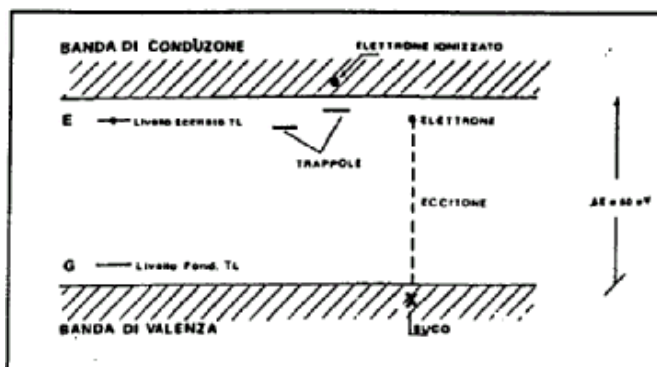
Cristalli	NaI(Tl), CsI(Tl), LiI(Eu), BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )
Polveri cristalline	ZnS(Ag)
Vetri	
Gas nobili	

#### SCINTILLATORI ORGANICI

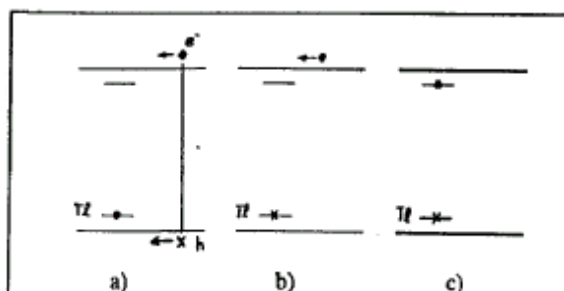
Cristalli	Antracene
Soluzioni solide	Uno o più soluti organici in plastica
Soluzioni liquide	Uno o più soluti organici in liquidi organici

### 3.1 SCINTILLAZIONE NEI CRISTALLI INORGANICI

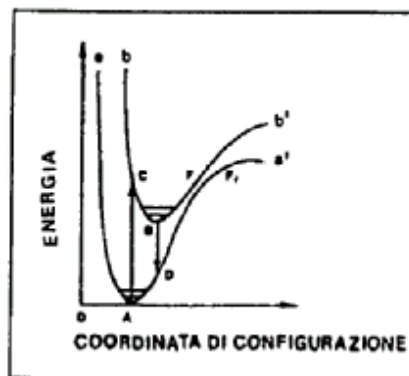
In un cristallo intrinseco gli elettroni si trovano nella banda di valenza che è separata dalla banda di conduzione da una terza banda detta proibita. Nei cristalli reali si possono trovare imperfezioni del tipo: impurità interstiziali o di sostituzione, eccesso stechiometrico di un elemento, difetti reticolari. Tali imperfezioni possono dar luogo a dei livelli elettronici nella banda proibita. A tali livelli sono associati centri di luminescenza, centri di dissipazione (quenching) e trappole metastabili. Per aumentare il numero di centri di luminescenza si fa in modo da sostituire uno ione positivo nel cristallo ( $\text{Na}^+$ ) con un elemento di caratteristiche simili ( $\text{Tl}^+$ ) detto attivatore. Nella figura seguente abbiamo riportato la struttura a bande di un cristallo contenente come centro attivatore un atomo di Tl.



Il passaggio di una radiazione ionizzante nel cristallo può provocare la transizione di un certo numero di elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione (l'energia spesa dalla particella per creare una coppia elettrone-lacuna è di circa 20 eV). La lacuna e l'elettrone risultano nel cristallo solo debolmente legati e possono muoversi liberamente. Quando la lacuna incontra un attivatore lo ionizza. L'elettrone nella banda di conduzione se incontra uno di questi attivatori ionizzati da luogo a un atomo neutro eccitato (vedi figura seguente).



L'atomo attivatore nello stato eccitato torna allo stato fondamentale o attraverso una transizione radiativa o attraverso processi dissipativi come mostrato nella figura qui di seguito.

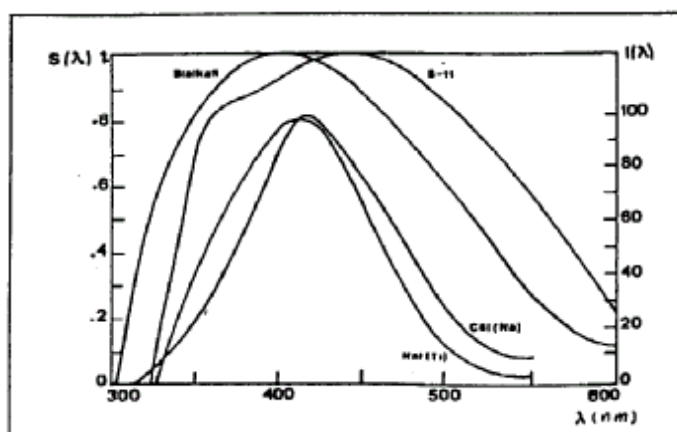


Energia potenziale di un centro attivatore o di una molecola nel suo stato fondamentale (aAa') ed eccitato (bBb').

Nei processi radiativi, poiché  $E_{AC} \neq E_{BD}$ , il cristallo è trasparente ai fotoni emessi. La legge che governa il processo di emissione radiativa è quella tipica del decadimento radioattivo (il tempo di formazione di un attivatore eccitato è di circa  $10^{-12}$  sec che risulta molto inferiore del tempo di decadimento caratteristico  $\tau \approx 10^{-7}$  sec.):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dove con  $N_0$  abbiamo indicato il numero di attivatori efficaci al tempo  $t=0$ . Per lo scintillatore NaI(Tl) il tempo caratteristico vale  $\tau=250$  ns e lo spettro dei fotoni emesso è centrato intorno a 410 nm (violetto). Lo spettro non è monocromatico a causa dei numerosi stati vibrazionali possibili.



Spettro dei fotoni emessi da alcuni scintillatori.

Nei processi dissipativi, invece, l'attivatore eccitato può tornare allo stato fondamentale assumendo energia termica passando da B ad F e poi da F a  $F_1$  e, quindi, ad A attraverso processi non radiativi a favore dell'energia vibrazionale del reticolo cristallino.

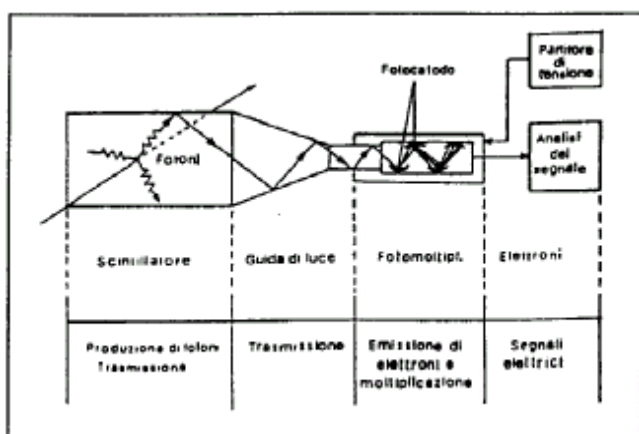
Nello scintillatore NaI(Tl) L'efficienza dei processi radiativi è del 13%; perciò se una particella carica deposita 1 MeV di energia nel cristallo solo 130 KeV saranno rilasciati sotto forma di energia luminosa.

Nella tabella abbiamo raccolto le caratteristiche più importanti dei principali materiali inorganici scintillanti impiegati nella costruzione di contatori a scintillazione.

Materiale	$\rho$ ( $\frac{g}{cm^3}$ )	indice di rifrazione	$\tau$ (ns)	$\lambda_{max}$ (nm)	$\eta$ ( $\frac{\text{fotoni}}{\text{keV}}$ )	proprietà	principale uso
NaI(Tl)	3.7	1.85	250	410	43	igroscopico	$\gamma$ di ogni E
CsI(Tl)	4.5	1.80	1000	560	52		cariche, $\gamma$ b. E
LiI(Tl)	4.1	1.96	1400	470	11	igroscopico	basse E
ZnS(Ag)	4.09	1.49	200	450	52	poli-cristal.	cariche
BGO	7.1	2.15	300	480	8.2	non igrosc.	$\gamma$ alte E

### 3.2 CONVERSIONE DEL SEGNALE LUMINOSO IN ELETTRICO

Il segnale luminoso prodotto nel materiale scintillante dal passaggio di una particella nucleare viene trasportato attraverso una guida di luce ad uno strumento detto FOTOMOLTIPLICATORE (PMT), che genera un impulso elettrico le cui caratteristiche dipendono dal segnale luminoso stesso. L'insieme *scintillatore-guida di luce-fotomoltiplicatore* costituisce un contatore a scintillazione il cui schema è riportato nella figura seguente.



Schema di funzionamento di un contatore a scintillazione

Per le ragioni che esporremo di seguito, il PMT (fotocatodo e dinodi) ha dimensioni piuttosto limitate. Per convogliare sulla superficie del fotocatodo il maggior numero di fotoni emessi ( isotropamente) nello scintillatore dal passaggio di una particella, una superficie dello scintillatore viene raccordata mediante una guida di luce con la superficie del fotocatodo. Dal momento che la luce di scintillazione è emessa isotropamente, per

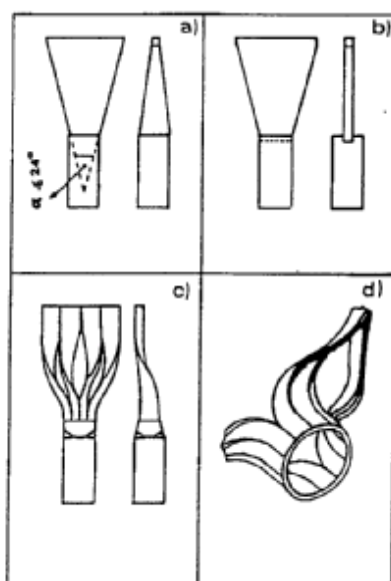
migliorare l'efficienza di raccolta dei fotoni sul fotocatodo del PMT le superfici dello scintillatore e della guida di luce vengono ricoperti da riflettori speculari ( vernici o fogli di alluminio). Con questo accorgimento la frazione di luce trasmessa dallo scintillatore al PMT può addirittura raddoppiare e raggiungere, per guide di luce di 40 cm di lunghezza, valori di circa il 40%. Sebbene trasparenti, guide di luce e scintillatori assorbono la luce che si attenua secondo la:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{d}}$$

dove  $I_0$  è l'intensità del fascio di fotoni all'istante  $t=0$  e  $d$  la lunghezza di attenuazione del materiale che per gli scintillatori plastici è dell'ordine dei 2÷3 m.

In moltissime applicazioni le superfici dello scintillatore e del PMT non hanno la stessa forma né la stessa area. Per ridurre al minimo le perdite di energia nella guida sono state studiate e realizzate guide di forme e materiali diversi a seconda dell'esigenza; nella figura riportiamo le più comuni:

Alcune forma di guida di luce comunemente impiegate nella realizzazione di contatori a scintillazione.



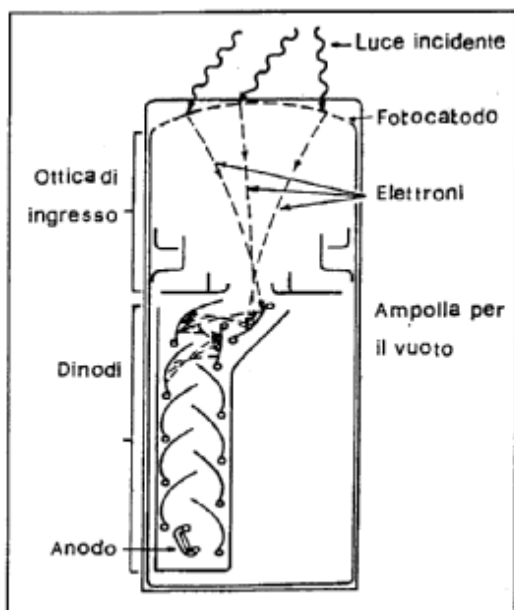
In generale qualunque sia la forma della guida il flusso di fotoni per unità di area e di angolo solido in un punto qualsiasi della guida non può mai superare il flusso di ingresso.

Si dimostra che la massima frazione di luce che può essere trasmessa dallo scintillatore al PMT è pari al rapporto tra la superficie del PMT e quella dello scintillatore:

$$\eta_{\tau} = \frac{S_{PMT}}{S_{scint}}$$

chiaramente valida per  $S_{PMT} \leq S_{scint}$ .

Il PMT è schematizzato nella figura seguente.



Schema di un PMT a foceggiamento lineare

In un'ampolla di vetro in cui è stato praticato il vuoto si trovano:

- **FOTOCATODO:** lega semiconduttrice semitrasparente fotosensibile capace di emettere elettroni quando viene colpita dalla luce;
- **OTTICA D'INGRESSO:** insieme di elettrodi per convogliare gli elettroni emessi dal fotocatodo sul primo dinodo;
- **DINODI:** elettrodi tenuti a tensione via via crescente, costituiti da materiali con alta probabilità di emissione secondaria quando colpiti da elettroni;
- **ANODO:** elettrodo finale per raccogliere il segnale generato dal PMT.

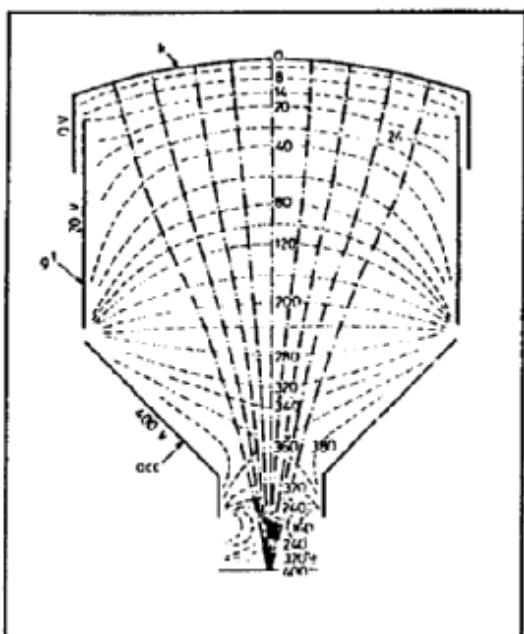
Nelle tabella seguente sono riportate le proprietà caratteristiche di alcuni materiali usati per la costruzione di fotocatodi:

Materiale	Intervallo $\lambda$ (nm)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$\eta_q(\lambda_{\max})$	Nome
AgOCs	300-1100	800	0.004	S1
BiAgOCs	170-700	420	0.068	S10
Cs <sub>3</sub> Sb-O	160-600	390	0.19	S11
Na <sub>2</sub> KsSb-Cs	160-800	380	0.22	S20
K <sub>2</sub> CsSb	170-600	380	0.27	bialkali

Si tratta di leghe contenenti uno o più metalli alcalini (Na, K, Cs) e di elementi del V gruppo (Sb). La quantità  $\eta_q$  che compare in tabella è detta efficienza quantica ed equivale al rapporto tra il numero di fotoelettroni emessi e il numero di fotoni incidenti sul fotocatodo. Per varie ragioni è molto difficile ottenere valori di  $\eta_q$  superiori a 0.25. La principale di

queste ragioni è che gli elettroni prodotti nel materiale fotosensibile per effetto fotoelettrico devono avere energia sufficiente per attraversare il deposito che costituisce il fotocatodo e per superare la barriera di potenziale che li tiene all'interno del materiale stesso ( il lavoro di estrazione, ossia l'energia minima che deve possedere un elettrone alla superficie del materiale per vincere la barriera di potenziale che lo trattiene all'interno del materiale stesso, vale  $3\div 4$  eV per i metalli e  $1.5\div 2$  eV per i semiconduttori). Se si utilizzasse un metallo come fotocatodo l'efficienza di conversione fotone-elettrone sarebbe prossima ad uno ma la probabilità che un elettrone sfugga dal metallo stesso sarebbe praticamente nulla (uno strato di metallo profondo solo 1 nm è sufficiente ad impedire agli elettroni prodotti al suo interno di uscire). Le leghe semiconduttrici, invece, assicurano una discreta efficienza di conversione dei fotoni ed un'alta probabilità per i fotoelettroni di riuscire a fuggire dal fotocatodo.

Il sistema d'ingresso di un PMT è riportato nella seguente figura.



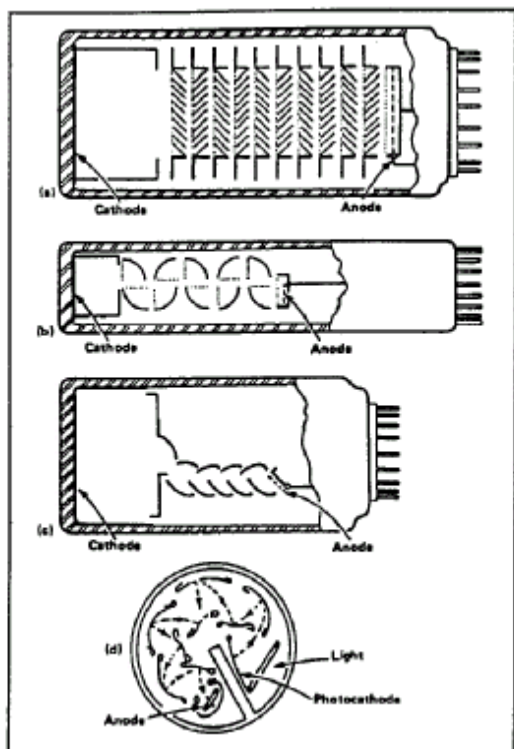
Ottica elettronica d'ingresso di un PMT. Le linee tratteggiate rappresentano le superfici equipotenziali mentre quelle continue le traiettorie degli elettroni

Il suo scopo è quello di raccogliere sul primo dinodo tutti gli elettroni uscenti dal fotocatodo senza introdurre differenze temporali tra i vari elettroni. L'ottica di ingresso è la parte più complicata del PMT. Spesso tra fotocatodo e primo dinodo sono poste delle griglie focalizzatrici il cui potenziale va regolato in modo da minimizzare le differenze di tempo di transito dovute a diverse lunghezze di percorso.

I dinodi sono costituiti da materiali in cui risulta molto probabile il fenomeno della emissione secondaria di elettroni quando la sua superficie è colpita da elettroni. In genere i



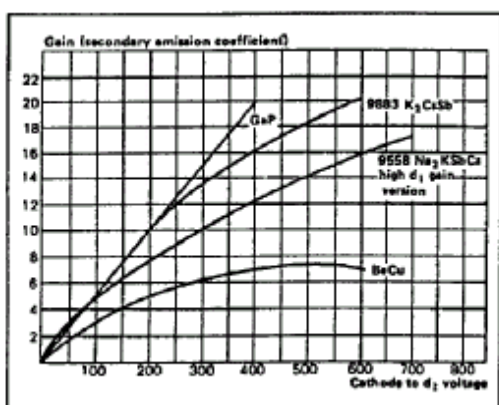
materiali usati hanno un lavoro di estrazione di  $2\div 3$  eV. Se si accelerano elettroni, tra un dinodo e l'altro, a 100 eV, ad esempio, si potrebbero ottenere fino a 30 elettroni eccitati in grado di uscire dal dinodo stesso. In realtà solo alcuni di questi elettroni (tipicamente  $4\div 5$ ) faranno parte della componente secondaria dal momento che molti di essi, muovendosi a caso nel materiale, non riusciranno a raggiungere la superficie. Nella figura sottostante sono mostrate le forme che vengono più comunemente date ai dinodi:



- a) a veneziana
- b) a scatole grigie
- c) a gabbia circolare
- d) a fuocheggiamento lineare

Quella veneziana dà particolare stabilità al PMT, ma comporta tempi di salita piuttosto lunghi. Le altre sono invece impiegate per ottenere buone risoluzioni temporali.

Il numero di elettroni secondari per elettrone incidente viene comunemente indicato con il nome di fattore di moltiplicazione  $\delta$  (o fattore di emissione secondaria). Questo numero è una funzione dell'energia dell'elettrone primario.



La figura a sinistra mostra la dipendenza del fattore di emissione secondaria dalla tensione applicata tra catodo e primo dinodo per i diversi materiali utilizzati per la realizzazione dei dinodi.

In una catena di moltiplicazione l'energia degli elettroni incidenti su ciascun dinodo è chiaramente funzione della d.d.p.  $V_d$  applicata ai dinodi stessi, cosicchè in genere si ha:

$$\delta = K(V_d)^\alpha$$

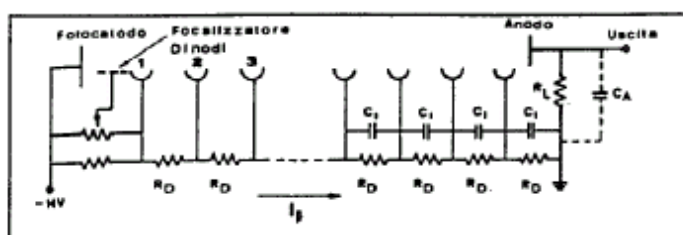
con  $\alpha \leq 1$ .

Utilizzando un PMT ad  $n$  stadi con la stessa tensione  $V_d$  tra ogni coppia di dinodi si ha un guadagno totale pari a

$$G = \delta^n = [K(V_d)^\alpha]^n$$

In numero  $n$  di stadi dei fotomoltiplicatori più comunemente utilizzati è compreso tra 9 e 12; la tensione ai dinodi  $V_d$  è dell'ordine di circa 150 V ed  $\alpha$  è compreso tra 0.7÷0.8. Si ricava allora che il fattore di moltiplicazione  $\delta$  è compreso tra 4÷6 e che il guadagno totale  $G$  è compreso tra  $10^6$ ÷ $10^{10}$ .

Uno dei fenomeni che limitano il guadagno è la cosiddetta **corrente in oscurità** o di buio: in assenza di segnale luminoso sul fotocatodo, sull'anodo può presentarsi un segnale. La causa principale di questo fenomeno è da ricercarsi nella emissione termoionica degli elettrodi. Di conseguenza tale corrente è dovuta alla emissione di termoelettroni da parte del fotocatodo e dei primi dinodi (cioè degli elettrodi a monte del processo di moltiplicazione). In genere si preferisce trovare un utile compromesso tra alto guadagno e bassa corrente in oscurità. I dinodi vengono alimentati attraverso un partitore di tensione in cui la corrente  $I_p$  risulta molto maggiore della corrente interna al PMT come mostra la figura sottostante.



Partitore di tensione per alimentare un PMT

Questa richiesta può diventare difficile da ottenere per gli ultimi stadi: la corrente di picco può avere intensità paragonabile ad  $I_p$ . Per questa ragione si usano delle capacità stabilizzatrici tra gli ultimi stadi che forniscono momentaneamente la corrente persa dal dinodo durante l'impulso e sono poi ricaricate attraverso il partitore nell'intervallo tra due impulsi. Le cariche infine generate nel fotomoltiplicatore vengono raccolte nell'ultimo elettrodo detto anodo. L'anodo ha una capacità verso massa di 10÷20 pF ed è messo a terra attraverso una resistenza il cui valore determina la costante di tempo del segnale.

Il segnale sull'anodo è un impulso di corrente la cui carica totale è proporzionale al numero iniziale  $n$  di elettroni emessi dal fotocatodo. L'andamento temporale del segnale di tensione sull'anodo può essere ottenuto nel seguente modo. Assumiamo che la luce sia emessa dallo scintillatore con una costante di decadimento  $\tau_s$ . La corrente nel fotomoltiplicatore varrà perciò

$$i(t) = i(0)e^{-t/\tau_s}$$

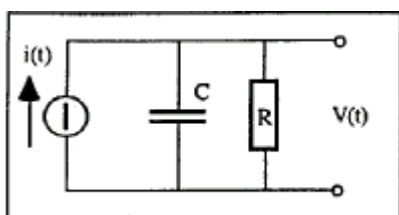
La carica totale raccolta sull'anodo sarà:

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt = i(0) \tau_s$$

Da cui si ottiene

$$i(t) = \frac{Q}{\tau_s} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_s}} = \frac{Gne}{\tau_s} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

Il circuito elettrico equivalente del contatore a scintillazione può essere schematizzato come segue:



Il circuito equivalente di un fotomoltiplicatore. Il PMT può essere considerato come un generatore ideale di corrente in parallelo con una resistenza e una capacità

La resistenza  $R$  e la capacità  $C$  rappresentano la resistenza e la capacità intrinseca dell'anodo compresi tutti quegli altri elementi del circuito in uscita come ad esempio il cavo, la resistenza di carico, ecc..

La corrente  $i(t)$  si ripartirà tra la capacità  $C$  e la resistenza  $R$  dell'anodo:

$$i(t) = i_c + i_R = C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R}$$

Usando l'espressione di  $i(t)$  appena ricavata si ottiene:

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{RC} = \frac{\lambda Q}{C} e^{-\lambda t}$$

La soluzione di questa equazione differenziale, con la condizione iniziale  $V(0)=0$ , è

$$V(t) = \frac{GneR}{\tau - \tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau}) \quad \text{per } \tau \neq \tau_s$$

$$V(t) = \frac{GneR}{\tau_s^2} \cdot t \cdot e^{-t/\tau_s} \quad \text{per } \tau = \tau_s$$

dove  $\tau = RC$ . Per  $\tau \ll \tau_s$  il segnale riproduce interamente l'andamento temporale del segnale luminoso prodotto nello scintillatore dalla particella incidente. Il segnale risulta molto piccolo e molto rapido. In questo caso la tensione  $V(t)$  è dovuta essenzialmente alla corrente che circola nella resistenza  $R$  del circuito e si dice che il modo di operare del PMT è quello in corrente.

Per  $\tau \gg \tau_s$  l'ampiezza del segnale diventa più grande; in questo caso la corrente  $i(t)$  è integrata sulla capacità  $C$  del circuito e si dice che il modo di operare del PMT è quello in tensione.

### 3.3 SEGNALI DI RUMORE

Per tutti i rivelatori, e in particolare per quelli quantistici, esiste il problema del rumore (NOISE). Distinguiamo quattro diversi tipi di segnali di rumore:

- **RUMORE INTRINSECO:** è legato al segnale luminoso in arrivo e segue una statistica Poissoniana. Il rumore intrinseco è proporzionale alla radice quadrata dell'intensità del segnale stesso.
- **RUMORE DI BUIO:** abbiamo già accennato in precedenza a questo tipo di segnale ed è dovuto al fatto che, anche in assenza di segnale d'ingresso, lo strumento rileva sempre "qualcosa". È caratteristico del detector e delle sue condizioni di funzionamento (tensione applicata, temperatura, etc.. In generale il valore di rumore di buio viene fornito dalla casa costruttrice del detector.
- **RUMORE DOVUTO ALL'ELETTRONICA:** è originato da tutti i circuiti che seguono il detector (amplificatori, processori, etc.). Ad esempio i semiconduttori creano coppie elettrone-lacuna che ricombinandosi generano fotoni.

Si definisce rapporto segnale –rumore la seguente quantità:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{\text{segnale}}{\text{rumore}}$$

dove SNR stà per "Signal to Noise Ratio". Il segnale luminoso da rilevare deve produrre un segnale di corrente almeno pari a quello prodotto dal rumore caratteristico dell'apparecchio:

non avrebbe senso infatti cercare di misurare un segnale più basso di quello originato dal rumore.

Si definisce inoltre:

NEP (Noise Equivalent Power) come la potenza ottica (o radiante) incidente necessaria per avere un rapporto  $SNR=1$ .

Più basso è il NEP più si riesce a misurare segnali bassi.

## 4. DESCRIZIONE APPARATO DI MISURA

L'apparato di misura è composto da un'unità principale supportata da un set di accessori per la misurazione dei diversi tipi di decadimento radioattivo. L'unità principale ( AB-5 Portable Radiation Monitor) ha un largo numero di moduli di assemblaggio con i quali può essere utilizzato per effettuare misure di gas RADON e THORON, prodotti di decadimento volatili, contaminazioni di superfici, radiazione beta, raggi gamma e raggi X. Alcune applicazioni pratiche dell'AB-5 con i suoi accessori collegati includono:

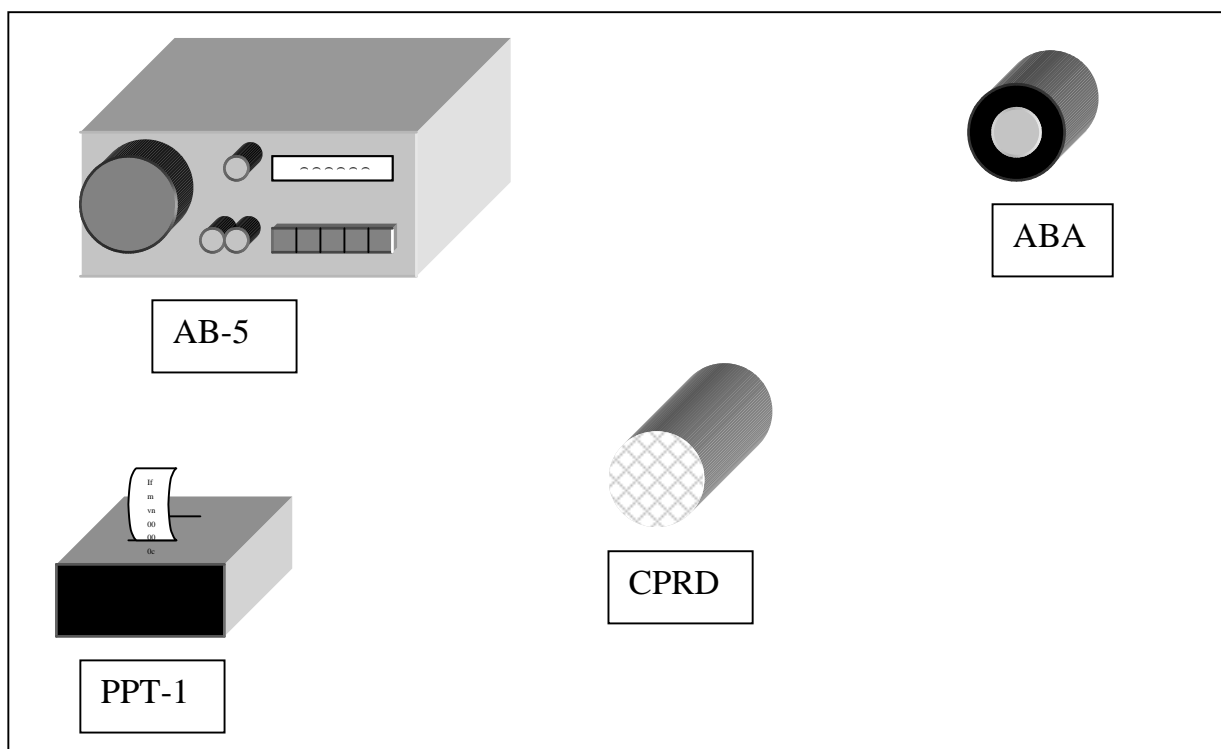
- Misurazioni di concentrazione di gas Radon e Thoron in case, edifici, acqua, miniere, terreni o ambienti (tipicamente in pCi/l oppure in Bq/m<sup>3</sup>);
- Misure di concentrazione dei prodotti di decadimento del Radon e del Thoron in case, edifici, acqua, miniere, terreni o ambienti (tipicamente in Working Levels [WL]);
- Misurazioni di emissioni alfa e beta da parte di superfici contaminate nei laboratorio nell'ambiente (tipicamente in Bq/cm<sup>2</sup>);
- Misurazioni di radiazione gamma, X e beta nell'ambiente in laboratori medici, attorno a reattori (tipicamente in µR/hr).

Per quel che ci riguarda ci occuperemo di misurazioni di Radon in edifici per cui l'apparato AB-5 verrà utilizzato esclusivamente con il seguente accessorio:

- Modello CPRD (Continuos Passive Radon Detector): per misurare gas Radon in pCi/l oppure in Bq/m<sup>3</sup>;

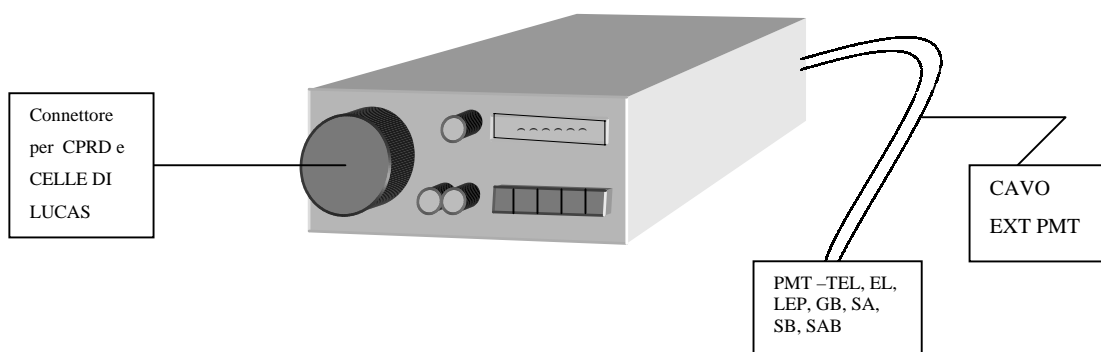
Inoltre l'apparato AB-5 è corredato di una stampante portatile PPT-1, di un'interfaccia CI-55, che consente la connessione del contatore ad un PC, e infine di un adattatore ABA utilizzato per montare gli accessori CPRD e CELLE DI LUCAS al contatore.

La descrizione grafica dell'apparato è riportata nella pagina seguente.



## 4.1 UNITA'PRINCIPALE AB-5

L'AB-5 è un monitor portatile. Questa unità di acquisizione dati , come già detto, fornisce misurazioni di diversi tipi di decadimenti radioattivi grazie a un vasto numero di accessori opzionali. Alcuni accessori si montano direttamente sul pannello frontale dell'AB-5 mentre altri si connettono via cavo coassiale al pannello posteriore dello stesso:



Gli accessori che si connettono alla parte posteriore dell'AB-5 (PMT-TEL, EL, etc.) non verranno descritti poiché non utilizzati per effettuare le misure di Radon in questo esperimento. Oltre al connettore, che permette l'utilizzo degli accessori, sulla parte frontale del pannello dell'AB-5 troviamo un display ed alcuni interruttori e pulsanti di controllo. Il pannello posteriore ha diverse porte di connessione, dei regolatori e degli interruttori. L'AB-5 contiene una batteria ricaricabile, un sistema di pompaggio di aria, un fotomoltiplicatore PMT e una componente elettronica con un software di gestione dati. La batteria fornisce la potenza richiesta dall'AB-5 e dal PMT e può essere ricaricata mediante un trasformatore elettrico, PYLON MODEL RM-122.

La pompa d'aria interna può essere usata, per gli accessori che ne richiedono l'uso, con un flusso d'aria massimo di 3.0 l/min, regolabile mediante un potenziometro disposto sul pannello posteriore dell'AB-5. Tuttavia si può installare una pompa d'aria esterna qualora le applicazioni richiedano un flusso d'aria superiore o si voglia conservare più a lungo la batteria interna del contatore.

#### **4.1.1 FUNZIONAMENTO DELL'AB-5**

Il principio di funzionamento dell'AB-5 con gli accessori che si collegano al pannello frontale è il seguente: uno scintillatore nell'accessorio genera impulsi di luce in risposta all'energia rilasciata dalle particelle emesse dal materiale radioattivo. Questi impulsi di luce vengono amplificati grazie a un fotomoltiplicatore PMT e convertiti in impulsi elettronici i quali vengono inviati su un circuito stampato interno dell'AB-5. In esso un microprocessore conta e registra gli impulsi su intervalli scelti dall'operatore.

I modi di funzionamento dell'AB-5 sono quattro: RADON MODE, CONTINUOS MODE, QUASI MODE, RATEMETR MODE. La descrizione dettagliata di questi modi verrà trattata in seguito.



## 4.1.2 DESCRIZIONE DEL PANNELLO FRONTALE

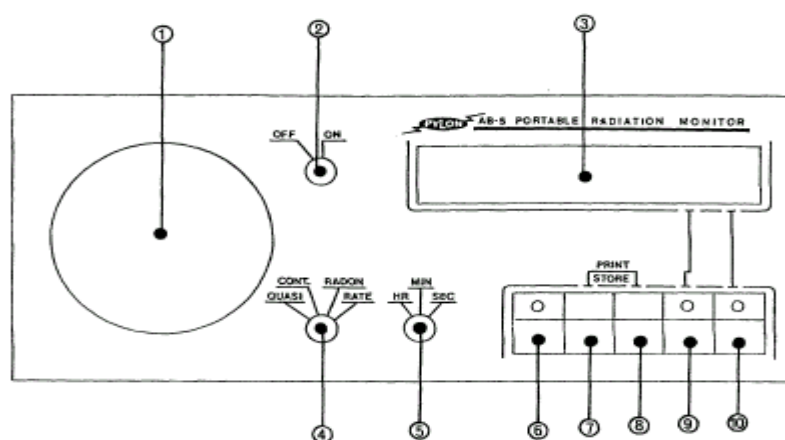


FIGURA 1

1. Connettore per accessori e fotomoltiplicatore interno PMT
2. Interruttore ON/OFF
3. Display
4. Interruttore per selezionare il modo operativo
5. Interruttore per selezionare gli intervalli temporali
6. Pulsante di richiamo
7. Pulsante di stato
8. Pulsante di programmazione
9. Pulsante di attivazione pompaggio
10. Pulsante START/STOP

Descriviamo ora tutte le componenti del pannello frontale nell'ordine in cui sono numerate in figura:

1. questa componente presenta un tappo che, una volta asportato, mostra un filettatura sulla quale vengono avvitate gli accessori CPRD e CELLE DI LUCAS tramite l'adattatore ABA. La funzione del tappo è quella di coprire il fotomoltiplicatore interno dell'AB-5, proteggendolo dalla luce esterna;
2. una volta ricaricata la batteria interna dello strumento, è possibile accendere o spegnere l'apparecchio tramite questo interruttore;
3. su questo display alfanumerico si possono leggere: tempi, date, concentrazioni di gas Radon (con una cifra decimale in pCi/l oppure senza cifre decimali in Bq/m<sup>3</sup>), conteggi non elaborati (nel caso in cui l'apparecchio sia utilizzato nella modalità CONT). Il display lampeggia quando la batteria ha bisogno di essere ricaricata;
4. questo interruttore presenta quattro posizioni tramite le quali è possibile selezionare il modo operativo del contatore;
5. questo interruttore presenta tre posizioni tramite le quali è possibile selezionare gli intervalli temporali sui quali il contatore effettuerà i conteggi;
6. pulsante che consente di richiamare i dati memorizzati nella memoria interna del contatore;
7. premendo questo pulsante sul display verranno visualizzati: il numero della serie di conteggi che l'AB-5 sta effettuando oppure dell'ultima serie già effettuata, il numero

di cicli e di intervalli. Usato nel modo RADON questo pulsante ci permette di vedere sul display il tempo trascorso durante una misura;

8. questo pulsante è utilizzato per programmare i parametri di funzionamento del contatore;
9. premendo questo pulsante si mette in funzione la pompa interna del contatore;
10. questo pulsante è usato per far partire e fermare i conteggi.

L'ultima serie di pulsanti (6-10) è utilizzata anche in maniera combinata in modo da poter programmare o visualizzare ulteriori parametri.

### 4.1.3 DESCRIZIONE DEL PANNELLO POSTERIORE

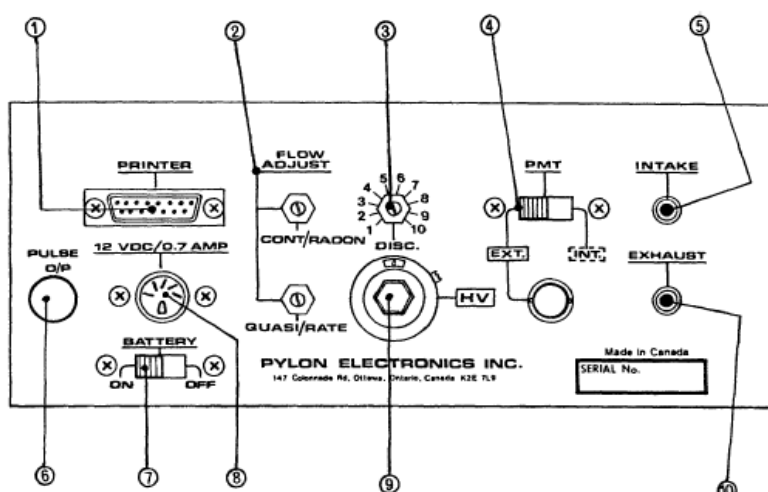


FIGURA 2

1. Porta per connessione stampante
2. Regolatore di flusso
3. Regolatore per il Disc
4. Interruttore di selezione PMT interno o PMT esterno
5. Porta d'ingresso della pompa
6. Connettore per impulsi esterni
7. Interruttore On/Off per la batteria
8. Connettore per 12 VDC
9. Regolatore High Voltage
10. Porta d'uscita della pompa

Descriviamo ora tutte le componenti del pannello posteriore nell'ordine in cui sono numerate in figura:

1. a questa porta può essere collegata la stampante PPT-1;
2. questi due switch di controllo servono a regolare il flusso della pompa interna dell'AB-5 quando questa è in uso. Quello superiore va usato quando si è nel modo CONT o RADON, mentre quello inferiore va utilizzato quando si sta operando nel modo QUASI o RATE;
3. questo controllo è usato per settare il valore del discriminante (DISC) del fotomoltiplicatore PMT interno. Il DISC fissa un livello di soglia in modo che l'AB-5 non effettui conteggi di segnali troppo bassi (rumore elettronico e rumore di buio del PMT);

4. questo switch a due posizioni va posizionato su INT se si deve utilizzare il PMT interno dell'AB-5, mentre, qualora si volesse utilizzare un accessorio esterno che possieda un PMT, lo switch va posizionato su EXT;
5. a questo ingresso va collegato il tubo per il passaggio dell'aria della pompa interna dell'AB-5;
6. questo connettore BNC permette di connettere l'AB-5 ad un accessorio esterno che utilizza un proprio PMT e che invia gli impulsi tramite un cavo BNC il quale va appunto collegato a questa porta;
7. questo switch serve a rendere attiva o inattiva la batteria interna dell'AB-5 la quale consente di tenere in memoria i dati salvati nella memoria interna dell'AB-5;
8. a questo connettore va collegato l'uscita del trasformatore di corrente RM-122 che consente di caricare la batteria interna dell'AB-5;
9. questo switch è utilizzato per settare il valore del livello di voltaggio (da 600 a 1100 Volts) del PMT interno o esterno. Infatti, poiché gli impulsi di luce dello scintillatore non sono abbastanza grandi per essere contati essi vengono amplificati dal PMT. Il livello di voltaggio del PMT viene regolato tramite l' HV Dial e determina il grado di amplificazione del PMT;
10. a questo uscita va collegato il tubo per il passaggio dell'aria della pompa interna dell'AB-5.

#### **4.1.4 MODI OPERATIVI DELL'AB-5**

L'AB-5 può essere utilizzato in quattro modalità differenti. I modi sono:

1. Continuous mode: in questa modalità l'AB-5 conta continuamente finché non viene fermato dall'operatore. I dati vengono riportati come conteggi per intervallo di tempo e quest'ultimo viene programmato dall'operatore. Per ogni serie di conteggi i primi 99 intervalli di conteggio vengono salvati nel ciclo 1, i successivi 99 intervalli vengono registrati nel ciclo 2, e così via.
2. Quasi mode – grab sampling: l'operatore programma l'AB-5 affinché conti per un ciclo e si arresti poi automaticamente. Il ciclo consiste in un numero programmato di intervalli; la lunghezza degli intervalli è programmata dall'operatore. Il dato è registrato come conteggio/intervallo per ogni intervallo. In questa modalità anche la

pompa interna dell'AB-5 può essere programmata per un intervallo specifico o per una serie di intervalli.

3. Quasi mode – continuous sampling: l'operatore programma l'AB-5 affinché conti per un numero programmato di cicli (da 2 a 99). Ogni ciclo consiste in un numero di intervalli programmato. Il dato è registrato come conteggio/intervallo in base alla lunghezza dell'intervallo programmato. Il conteggio si ferma automaticamente dopo il numero di cicli e intervalli programmato. La pompa interna può essere programmata per accendersi per un intervallo specifico o per una serie di intervalli durante ogni ciclo.
4. Radon mode: il modo Radon calcola la concentrazione di gas Radon in pCi/l o in Bq/m<sup>3</sup> (l'unità di misura può essere programmata) finché l'AB-5 non viene fermato dall'operatore. L'utilizzatore deve programmare la lunghezza dell'intervallo (in ore), il valore di fondo ambientale (in CPM =conteggi per minuto), e la sensibilità (in CPM/pCi/l per concentrazioni in pCi/l oppure in CPM/Bq/m<sup>3</sup> per concentrazioni in Bq/m<sup>3</sup>).

Il **valore del background** è il rumore che viene generato dagli accessori, dal fotomoltiplicatore e dall'AB-5. Una parte di questo rumore, quella dovuta all'elettronica (rumore elettronico) e al PMT (rumore di buio), può essere eliminata variando il DISC dial. L'altra parte (rilevata dall'accessorio+AB-5), non eliminabile, può essere quantizzata in CPM per poi essere considerata nell'analisi dei dati. La **sensibilità** è il valore usato per compensare le disintegrazioni e gli impulsi non contati dall'AB-5 e per convertire i conteggi in misure di radioattività (in Pci/l o in Bq/m<sup>3</sup>). Il fondo viene calcolato effettuando conteggi all'interno di un contenitore privo di radon. La sensibilità è determinata mediante una procedura di calibrazione con una sorgente radioattiva la cui attività è nota.

Il background e la sensibilità devono essere determinati prima di effettuare misure. L'AB-5 calcola e mostra la concentrazione di gas Radon per l'equivalente di 1 intervallo di lunghezza. I primi 99 intervalli di una serie di conteggi vengono registrati nel ciclo 1 del conteggio, i successivi 99 nel ciclo 2 e così via. La pompa interna non può essere programmata in questa modalità ma deve essere accesa o spenta mediante il pulsante sul pannello frontale dell'apparecchio.

5. Ratemeter mode: in questa modalità l'AB-5 calcola e mostra il rate medio di conteggi per minuti o per secondo finché non viene stoppato dall'operatore. Quando si opera in conteggi/sec il display viene aggiornato ogni 0.25 secondi. Quando si opera in conteggi/min il display viene aggiornato ogni secondo. I primi 99 rates di una serie di conteggi faranno parte del ciclo 1, i successivi 99 faranno parte del ciclo 2.

I modi 2, 3, 5 non verranno approfonditi perché non utilizzati ai fini dell'esperienza.

#### 4.1.5 IMPOSTAZIONE GENERALE DELL'AB-5

L'AB-5 ha un orologio interno che funziona anche quando l'AB-5 è spento, grazie alla batteria interna. Nel caso in cui la batteria è disattivata l'orologio cessa di funzionare. Le impostazioni dell'orologio sono state da noi regolate. La procedura di regolazione è la seguente:

- Abbiamo acceso il contatore mediante l'interruttore 2 (vedi FIG.1);
- Circa 5 secondi dopo l'accensione il display mostra questa situazione  

**8.8:8.8:8.8:8.8**
- Abbiamo premuto il pulsante 8 (FIG.1) ed abbiamo quindi regolato la data (aa.mm.gg) mediante i pulsanti 9 e 10 (FIG.1);
- Premendo nuovamente il pulsante 8 abbiamo regolato con la stessa procedura l'orario (hh.mm.ss);

Regolata l'ora abbiamo impostato l'unità di misura della concentrazione di gas Radon, che l'apparecchio fornisce in modalità RADON, in  $\text{Bq/m}^3$  utilizzando il pulsante 8 e successivamente il pulsante 10, finché sullo schermo non è apparsa la figura "CONC **hE9**". La possibilità di scelta era  $\text{Bq/m}^3$  oppure pCi/l. Il parametro di concentrazione determina l'uscita del dato di concentrazione di Radon (in modalità RADON), che verrà poi stampato, in  $\text{Bq/m}^3$  oppure pCi/l. Questo parametro determina inoltre il numero di cifre decimali nella concentrazione, ma l'apparecchio non può effettuare trasformazioni da un sistema di unità di misura all'altro;

- Ripremendo ripetutamente il pulsante 8, il display visualizza il numero di serie dell'AB-5, il firmware di livello di revisione e infine la scritta "**rEAdy**" la quale indica che l'apparecchio è pronto per effettuare misure.

#### 4.1.6 OPERAZIONI GENERALI NEL MODO CONT E RADON

È molto importante che l'accessorio utilizzato sia calibrato con l'AB-5. Il certificato di calibrazione dell'accessorio CPRD, che noi utilizzeremo, è datato 14/06/1999 con scadenza 9/03/2001. In genere la calibrazione andrebbe rifatta ogni sei mesi. Tuttavia, considerato il fatto che l'apparecchio non è mai stato utilizzato riteniamo ancora valida la vecchia

calibrazione. La prova effettuata sullo strumento (che descriveremo in dettaglio nel capitolo 5) conferma questa ipotesi.

La calibrazione serve a determinare la configurazione ottimale del DISC e dell' HV (vedi par. 3.1.3). Il valore della sensibilità è determinato attraverso la procedura di calibrazione.

Le procedure da seguire usando l'AB-5 e gli accessori per effettuare misurazioni dipendono dagli accessori e dal tipo di misure che si vuole realizzare. Tuttavia, una procedura generale può essere:

i) configurazione dell'apparato:

- Abbiamo caricato la batteria interna dell'apparecchio mediante il trasformatore RM-122 per 16 ore;
- Ci siamo assicurati che l'AB-5 fosse spento prima di esporre il PMT alla luce;
- Abbiamo acceso la batteria interna mediante l'interruttore 7 del pannello posteriore;
- Abbiamo connesso la stampante PPT-1;

ii) configurazione degli switchs di controllo e programmazione dei parametri:

- Abbiamo posizionato l'interruttore 4 del pannello posteriore su INT;
- Abbiamo effettuato la prova della calibrazione in modo da poter poi fissare il DISC e l'HV al valore del punto di lavoro. La descrizione dettagliata è rimandata nel capitolo 5;
- Abbiamo selezionato mediante l'interruttore 4 del pannello frontale la modalità CONT e mediante lo switch 5 del medesimo l'intervallo di tempo a minuti. Abbiamo, quindi, acceso l'apparecchio mediante lo switch 2. Premendo il pulsante 8 abbiamo verificato la possibilità di variare la lunghezza dell'intervallo (00 – 99). In questo caso le due cifre rappresentano la durata dell'intervallo, su cui l'AB-5 effettuerà i conteggi, in minuti (le due cifre potevano indicare l'intervallo di tempo in ore o in secondi in base alla scelta effettuata con lo switch 5). Ripremendo il pulsante 8 si ritorna alla modalità "rEAdy";
- Abbiamo selezionato mediante l'interruttore 4 del pannello frontale la modalità RADON. In questo caso l'intervallo di tempo deve essere necessariamente calcolato in ore, perciò abbiamo posizionato lo switch 5 su HR. Il pulsante 8 consente di variare l'intervallo di ore, di registrare il valore della sensibilità (in CPM/pCi/l per concentrazioni in pCi/l oppure in CPM/Bq/m<sup>3</sup> per concentrazioni in Bq/m<sup>3</sup>), di variare il valore del fondo ambientale e poi di ritornare alla modalità "rEAdy".

#### **4.1.7 RACCOLTA E VISUALIZZAZIONE DATI**

I dati immagazzinati in modalità CONT possono essere richiamati o stampati sull'AB-5 affinché si possa stimare da questi la concentrazione di radon del campione analizzato. In modalità RADON, invece, i dati possono essere richiamati o stampati ma la concentrazione del campione viene calcolata direttamente dall'AB-5, senza effettuare altri calcoli. I dati in memoria possono essere visualizzati sul display sia quando l'AB-5 sta effettuando conteggi, sia quando è in stand-by, mentre possono essere stampati solo quando è in stand-by. Durante le operazioni di conteggio possiamo stampare solo i dati finali della misurazione in corso.

##### **Dati memorizzati**

I dati vengono memorizzati in serie, cicli e intervalli nei quali sono stati ottenuti. La memoria interna dell'AB-5, di capacità 2048 bytes con un totale di 675 intervalli a disposizione, può essere resettata premendo i pulsanti 6 e 8 del pannello frontale contemporaneamente. L'AB-5 automaticamente numera ogni serie, ciclo e intervallo. La prima serie parte quando la memoria dell'AB-5 è completamente vuota, questa la serie #1, la serie successiva sarà la serie #2, e così via. Il primo ciclo di una serie sarà numerato come ciclo #1, il successivo ciclo della stessa serie sarà il ciclo #2, etc.etc.. Il primo intervallo del ciclo sarà numerato come intervallo #1 e così via per quelli successivi.

I dati, nel modo CONT e RADON, saranno così ripartiti: i primi 99 intervalli di conteggi saranno contenuti nel ciclo #1, i successivi 99 nel ciclo #2 e così via finché la serie #n verrà fermata oppure la memoria sarà riempita. Se la serie viene fermata prima della fine dell'intervallo #1 del ciclo #1 non verrà registrato alcun dato della serie anche se il numero della serie verrà assegnato.

I dati non vengono salvati quando la batteria è spenta.

Se ci troviamo in modalità RADON e cambiamo i parametri di concentrazione e sensibilità non cambieranno i dati registrati.

##### **Visualizzazione dati.**

Per visualizzare o stampare i dati si usa la seguente procedura:

- i) si preme il pulsante 6 del pannello frontale e sul display viene visualizzato "FrEE XXX", dove XXX è la capacità di intervalli liberi rimanenti.

- ii) Si preme il pulsante 8 del pannello frontale e il display mostrerà “run XX” dove XX è il numero della serie corrente o il numero della serie più recente.
- iii) Se si desidera una serie diversa basta premere i pulsanti 9 e 10 del pannello frontale per modificare la cifra della serie desiderata.
- iv) Si preme il pulsante 8 per confermare la scelta. Se l’operatore inserisce un numero di serie assegnato, il display mostrerà “n C 01” dove nC sta per numero del ciclo che può essere modificato usando i pulsanti 9 e 10, come sopra.
- v) Ripremendo il pulsante 8 si conferma la scelta del numero di ciclo ed il display mostrerà “In 01” dove In sta per numero di intervallo che può essere modificato usando i pulsanti 9 e 10, come sopra.
- vi) Premendo il pulsante 8 si accetta la scelta desiderata. A questo punto se la luce del pulsante 6 è spenta non ci sono dati per l’intervallo, il ciclo e la serie specificati e il display mostrerà “rEAdy”. Se l’indicatore rimane acceso il display mostrerà i dati dell’intervallo specificato.

In questo modo l’operatore può visualizzare i dati richiesti oppure stamparli.

La procedura per la stampa dei dati è la seguente:

- Si seguono le procedure descritte sopra fino al punto (vi);
- Ci si assicura che l’indicatore del pulsante 6 sia acceso e che la stampante PPT-1 sia connessa all’AB-5;
- Si premono i pulsanti 7 e 8 contemporaneamente, si rilascia il 7 e la procedura è avviata.

Una descrizione del formato di stampa dei dati nei modi CONT e RADON è riportato di seguito.

a) modalità CONT:

```

AB-5 DATA RUN
SERIAL#: 0909
RUN#: 20
MODE: CONTINUOUS
INTERVAL 01 MIN.
START: 93/08/24
      09:55:44

```

CYC.	INT.	COUNT
01	01	1990
01	02	1999
01	03	1901
01	04	1070
01	05	1917
01	06	1962
01	07	1957
01	08	1978
01	09	2069
01	10	2014

```

STOP: 93/08/24
      09:05:57

```



La prima riga indica che i dati sono stati richiamati dalla memoria.

La seconda riga da il numero di serie dell’AB-5.

Le righe terza e quarta riportano il numero della serie di conteggi e la modalità di funzionamento dell’AB-5.

La quinta riga ci da la lunghezza dell’intervallo nel quale vengono effettuati i conteggi.

Le sesta e settima ci danno data e ora dell’ inizio della misura.

L’ottava riga è l’intestazione di una tabella: la prima colonna riporta il numero di cicli, la seconda è il numero di intervalli del ciclo, la terza è il conteggio effettuato in ogni intervallo.

Alla fine troviamo la data e l’ora della fine della misura.

PYLON è la casa costruttrice dell’AB-5.



## b) modalità RADON:

```

AB-5 DATA RUN
SERIAL#: 0909
RUN#: 09
MODE: RADON
INTERVAL 01 HRS.
SEN. : 01.32
B.G. : 01.00
START: 93/08/23
      17:13:16

CVC. INT. CONC&CNT
01 01 118924
* 1500.8
01 02 118928
* 1489.4
01 03 118387
* 1494.8
01 04 118619
  1497.0
01 05 118473
  1495.1
01 06 118882
  1500.3
01 07 118439
  1494.7
01 08 117833
  1487.8
01 09 117845
  1487.2
01 10 118797
  1499.2
01 11 118499
  1495.4
01 12 118708
  1498.1
01 13 118193
  1491.6
01 14 119624
  1509.6
01 15 118453
  1494.9

STOP: 93/08/24
      08:33:11
AUG: 1495.8pCi/l

```



La prima riga indica che i dati sono stati richiamati dalla memoria.

La seconda riga da il numero di serie dell'AB-5.

Le righe terza e quarta riportano il numero della serie di conteggi e la modalità di funzionamento dell'AB-5.

La quinta riga ci da la lunghezza dell'intervallo nel quale vengono effettuati i conteggi.

La sesta riga ci da il valore della sensibilità impostato prima della misura.

La settima riga ci da il valore del background in CPM (conteggi per minuto) impostato prima della misura.

Le righe ottava o nona ci danno data e ora di inizio della misura.

La decima l'intestazione di una tabella: la prima colonna ci da il numero del ciclo, la seconda il numero e di intervallo del ciclo, la terza la concentrazione di radon dell'intervallo, la quarta il conteggio dell'intervallo.

Alla fine troviamo la data e l'ora della fine della misura e all'ultima riga il valore medio della concentrazione di gas radon di tutti gli intervalli (con eccezione per i primi tre che i quali sono contrassegnati con un “ \* ”) dipendente dal background e dalla sensibilità usati.

PYLON è la casa costruttrice dell'AB-5.

## 5. CALIBRAZIONE DELLO STRUMENTO DI MISURA

Per effettuare le misure di Radon negli interni degli edifici utilizzeremo esclusivamente un solo accessorio, il detector CPRD. In questo capitolo ci occuperemo quindi della descrizione del CPRD e del processo di calibrazione di questo accessorio con l'unità principale AB-5.

### 5.1 ACCESSORIO CPRD: CARATTERISTICHE

Il modello CPRD è utilizzato con l'AB-5 per effettuare misure di concentrazione di gas Radon. Il CPRD è un detector passivo nel quale l'aria dell'ambiente diffonde continuamente attraverso un sottile filtro di poliuretano. Questo filtro fa sì che le particelle alfa presenti nell'ambiente non entrino all'interno del CPRD e che la concentrazione di Radon al suo interno si eguagli a quella dell'ambiente esterno dopo circa mezz'ora. E' importante considerare il fatto che **questo detector non è affetto da cambiamenti di temperatura, dall'umidità o da fumi presenti nell'ambiente.**

E' composto da una camera a scintillazione per la rivelazione di particelle alfa emesse durante il decadimento radioattivo del radon e dei nuclidi figli del radon. Le superfici interne del cilindro sono ricoperte da un solfuro di zinco attivato con rame, che è un materiale fluorescente (come già discusso nel capitolo 3). L'energia delle particelle alfa incidenti sulle pareti esterne della cella è convertita in impulsi luminosi e poi trasformata in impulso elettrico dal PMT dell'AB-5.

Il diametro interno del CPRD è 5.5cm e la lunghezza è di 12.2cm con un peso di 188g e un volume di 272 ml.

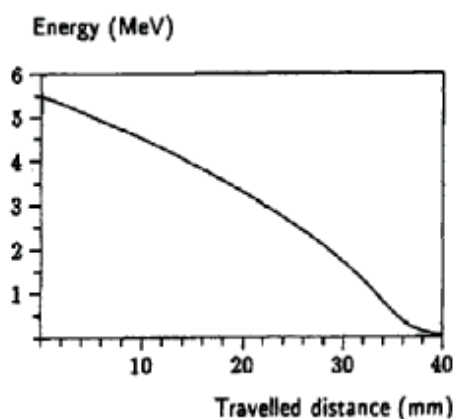
La parte opposta alla barriera di poliuretano è, in condizione di non utilizzo, normalmente ricoperta da un tappo di plastica. Nel momento dell'utilizzo il tappo viene asportato e questa estremità viene collegata all'estremità dell'adattatore ABA, la quale contiene una guarnizione il cui scopo è quello di prevenire gli scambi di aria con l'ambiente. Tutto il set

ABA+CPRD può essere montato sull'AB-5, pannello frontale, grazie ad un'altra filettatura interna dell'ABA, nell'estremità opposta a quella considerata prima, la quale si avvita alla corrispondente filettatura posta sulle superfici esterne del PMT.

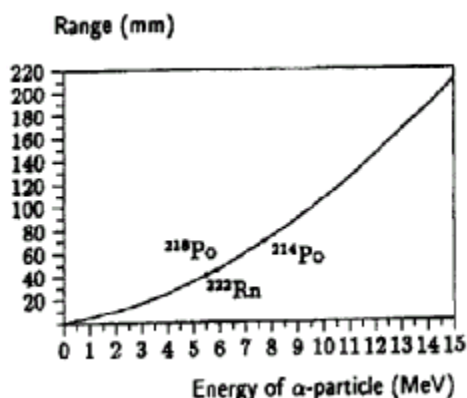
La quantità di energia che una particolare particella alfa rilascia sulle pareti interne della cella al momento dell'impatto dipende dalla lunghezza del tratto che essa deve percorrere dal luogo in cui avviene la disintegrazione fino alla parete del CPRD. **Il CPRD non è in grado, dunque, di distinguere fra le particelle alfa del Radon e le particelle alfa dei prodotti di decadimento del Radon.** Questo perché i nuclei si disintegrano in posizioni arbitrarie all'interno del volume della cella e le particelle alfa possono essere emesse in qualsiasi direzione.

L'energia delle  $\alpha$  rilasciate nello scintillatore dipende dalla distanza percorsa dalla particella nello scintillatore prima di urtare contro le pareti. Essa può essere determinata mediante la formula di Bethe & Bloch.

Una particella  $\alpha$  con energia tipica di 5.3 MeV necessita di circa 35.6 eV per produrre una coppia di ioni nell'aria. Grazie a questa quantità possono essere calcolati l'energia  $E(x)$  delle  $\alpha$  emesse dal  $^{222}\text{Ra}$  in funzione della distanza da esse percorsa nell'aria (Vedi figura in basso).



Visto che le particelle  $\alpha$  emesse da  $^{222}\text{Ra}$ ,  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$  hanno differenti energie esse avranno anche ranges diversi. Il range della particella  $\alpha$  in aria è schematizzato nel seguente grafico:



Affinché , quindi, il CPRD con l'AB-5 effettui conteggi di particelle  $\alpha$  provenienti dal decadimento del  $^{222}\text{Ra}$  va quindi eseguita una procedura di calibrazione mediante una sorgente di radon nota.

C'è da specificare che non tutte le particelle  $\alpha$  vengono trasformate in impulsi di luce poiché molte perdono tutta la loro energia durante il loro percorso (all'interno del CPRD) senza così poter arrivare sulle pareti interne dello scintillatore ed essere scintillate. Le serie di conteggi effettuati dall'AB-5 devono essere quindi compensate dal numero di particelle alfa non conteggiate. Uno speciale valore, noto come sensibilità (S), corregge questo scompenso e inoltre serve a convertire i conteggi della serie in concentrazione di gas Radon. Anche il valore di S viene determinato mediante il processo di calibrazione.

Il Nep (Noise Equivalent Power) del CPRD corrisponde a  $1,32 \text{ Bq/m}^3$ . Questo valore ci dice che non è possibile stimare concentrazione di Radon inferiori al valore di  $1,32 \text{ Bq/m}^3$ .

## 5.2 CALIBRAZIONE

E' molto importante che il sistema CPRD+AB-5 venga calibrato correttamente. Questa calibrazione deve essere effettuata dai tecnici addetti alla manutenzione dell'apparecchio (in genere sono alcune ditte ad occuparsi di ciò poiché la calibrazione richiede l'uso di accessori specifici). Questa procedura va ripetuta circa ogni sei mesi in base all'utilizzo dell'apparato. Il nostro sistema AB-5+CPRD è stato calibrato dalla ditta MIAM SRL in data 14 Giugno 1999 come risulta dal certificato di calibrazione in nostro possesso. Su questo viene indicata anche la data di scadenza della calibrazione che risulta essere 9 marzo 2001. Trovandoci quindi a circa tre mesi dalla scadenza, considerando il fatto che l'apparato non è mai stato utilizzato fin ora, tranne che per effettuare calibrazioni, possiamo ipotizzare

che tale calibrazione sia ancora valida. Tuttavia eseguiremo una prova della calibrazione per convalidare questa ipotesi.

### **5.2.1 SCOPO DELLA CALIBRAZIONE**

La calibrazione fa in modo che il contatore AB-5 con il CPRD possa essere utilizzato per effettuare misure di Radon in modo corretto. Visto che lo scintillatore CPRD non distingue le particelle alfa emesse dal Radon da quelle emesse dai suoi prodotti di decadimento, tale operazione serve, allora, a calcolare le concentrazioni di Radon e non quelle dei suoi prodotti di decadimento. In sintesi la calibrazione fornisce:

1. I valori ottimizzati di HV e DISC che consentono di eliminare il rumore elettronico dell'AB-5 e di buio del PMT e di effettuare misure di concentrazioni di Radon e non dei suoi prodotti di decadimento, in ambienti chiusi in cui si sia stabilito un equilibrio secolare fra Radon e i prodotti di decadimento (come spiegheremo tra breve);
2. il valore del rumore elettronico più quello del buio;
3. il valore della sensibilità, di cui abbiamo già parlato e spiegato l'utilità;
4. il valore del rumore misurato dal sistema AB-5+CPRD in assenza di Radon.

I punti 1 e 2 verranno verificati mediante una procedura di prova di calibrazione, mentre i punti 3 e 4 verranno descritti sommariamente al fine di dare maggiore delucidazioni sull'utilizzo di tali parametri.

### **5.2.2 CONDIZIONI DELL'UTILIZZO DELL'APPARATO DOPO LA CALIBRAZIONE**

Una volta fissato il punto di lavoro (cioè i valori ottimali di HV e DISC) sullo strumento e calcolati la sensibilità e il rumore ambientale, è possibile effettuare con lo strumento AB-5 + CPRD, in modalità RADON o CONT, misure di concentrazioni di Radon (in pCi/l o in Bq/m<sup>3</sup>) in ambienti chiusi (stanze, uffici, ecc.) nelle condizioni di equilibrio secolare del <sup>222</sup>Ra con i suoi prodotti di decadimento. Questo è possibile perché la procedura di calibrazione viene eseguita mediante una sorgente nota di Radon la quale simula un ambiente chiuso in equilibrio secolare.

Il Radon è in equilibrio secolare in un ambiente chiuso se l'attività di tutto i suoi prodotti di decadimento diventa uguale a quella del Radon, ovvero:

$$\frac{N_{Radon}}{\tau_{Radon}} = \frac{N_{218Po}}{\tau_{218Po}} = \frac{N_{214Pb}}{\tau_{214Pb}} = \dots$$

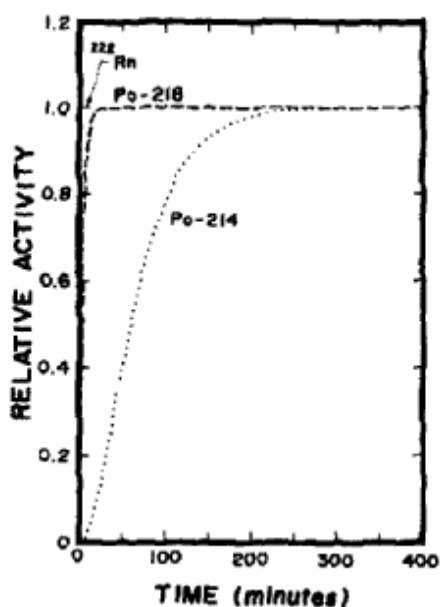
Dove gli N rappresentano i numeri di nuclidi del Radon e dei suoi discendenti e le  $\tau$  sono le corrispondenti vite medie.

Si può dimostrare che l'equilibrio si instaura dopo un tempo T:

$$T = -\left(\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1}\right) \cdot \ln\left(\frac{N_2 \cdot \tau_1}{N_1 \cdot \tau_2}\right)$$

Maggiore è  $N_2$ , maggiore sarà T.

Nella figura sottostante viene riportato un grafico teorico rappresentante l'andamento del numero di discendenti del Radon nel tempo:



Il grafico teorico dell'equilibrio secolare fra il Radon e i suoi discendenti in funzione del tempo.

Si può vedere dal grafico che per produzioni costanti di Radon l'equilibrio secolare si instaura dopo un tempo di circa 4 ore; quindi l'apparato effettua misure corrette (di particelle alfa emesse solo dal Radon) solo dopo 4 ore dall'istante in cui viene effettuato il primo conteggio.

Esistono però dei problemi che disturbano il raggiungimento dell'equilibrio secolare fra il Radon e i suoi discendenti. Tali processi sono:

- La ventilazione dell' ambiente in cui avvengono le misure
- La deposizione dei discendenti del Radon sulle superfici.

In tipici ambienti chiusi, come uffici e appartamenti residenziali, questi due fenomeni giocano un ruolo importante nella rimozione dei discendenti del Radon e nel conseguente rottura dell'equilibrio secolare.

L'effetto della ventilazione può essere facilmente e accuratamente calcolato. Tuttavia per edifici poco ventilati con finestre sempre chiuse e sistemi di ventilazione scarsi la rimozione per ventilazione può essere trascurata. Cercheremo dunque di eliminare questo problema, nelle misurazioni che effettueremo, assicurandoci che l'ambiente nel quale si va testare un'eventuale concentrazione di Radon sia molto poco ventilata e le condizioni meteorologiche del tempo siano in assenza di venti accentuati e di fenomeni burrascosi.

Anche con queste precauzioni non si elimina comunque il problema delle deposizioni. Questo diventa infatti molto accentuato in assenza di ventilazioni. Per esempio alcuni dei discendenti del Radon come il  $^{218}\text{Po}$  si attaccano alle superfici dei muri o di altri oggetti a causa dei fenomeni elettrostatici.

Quindi, mentre la ventilazione può essere quantificata o eliminata con le suddette precauzioni, la deposizione è difficile da quantificare e da eliminare. Essa infatti è un fenomeno di natura microscopica e dipende da un n° di fattori come la grandezza delle particelle, la loro carica, la natura chimica, i costituenti dell'aria e le condizioni delle superfici. Molti di questi parametri sono difficili da quantificare e ciò rende difficile il confronto tra dati sperimentali appartenenti a diversi tipi di esperimenti mirati ad uno studio di tale fenomeno. Quasi tutti i lavori presenti in letteratura sono rivolti a calcolare le velocità di deposizione dei discendenti del Radon.

Uno studio di tali fenomeni è al di fuori delle nostre possibilità e dei nostri scopi, date le difficoltà evidenti nell'approccio del problema e la mancanza di un apparato sperimentale adeguato allo studio. Tuttavia terremo presente il fenomeno qualora dovessero verificarsi fluttuazioni nelle misure che andremo ad effettuare.

E' molto importante sottolineare che le condizioni di umidità, temperatura, ecc..., sebbene influenzano il fenomeno della deposizione, non hanno alcun effetto sul rivelatore CPRD. Pertanto al fine delle misurazioni non verranno presi in considerazione tali parametri.

## 5.3 PROVA DI CALIBRAZIONE

Come abbiamo già detto nel paragrafo precedente, faremo ora una prova di calibrazione dello strumento.

### 5.3.1 DETERMINAZIONE DEL PUNTO DI LAVORO

Il punto di lavoro è la combinazione ottimale dei valori di DISC e di HV per il sistema CPRD+AB-5. Questa combinazione fa sì che venga contata la più alta percentuale di particelle alfa con un rumore (elettronico dell'AB-5 e di buio del PMT) minimo. Prima di determinare il punto di lavoro ci siamo assicurati che il CPRD non fosse stato utilizzato nelle precedenti 24 ore in modo da ridurre al massimo l'interferenza dovuta al rumore ambientale.

#### Determinazione del DISC:

Per determinare il DISC è necessario che il CPRD non sia connesso all'AB-5, che il PMT sia coperto dal suo tappo e che l'AB-5 sia rimasto spento per almeno qualche minuto. Una volta verificate tali condizioni abbiamo:

- selezionate il PMT interno dell'AB-5 mediante l'interruttore sul pannello posteriore;
- acceso l'AB-5;
- fissato l'HV al valore riportato sul certificato dell'ultima calibrazione (HV=4,5);
- regolato il DISC al valore 1;
- scelta la modalità CONT e selezionato l'intervallo temporale di misurazione al valore di 10 min.;
- premuto il pulsante START/STOP per avviare la procedura di conteggio;
- letto il conteggio riportato, alla fine di ogni intervallo, sul printout della stampante (PPT-1).

A questo punto è stato verificato che il conteggio letto avesse un valore inferiore o pari a tre, tale valore di conteggio è stato rilevato, dopo una serie di tentativi, per un valore del DISC pari a 3.9. Questa procedura permette di fissare un valore di soglia che ci dà la possibilità di scartare quei conteggi dovuti al rumore elettronico e del PMT.



## Determinazione del HV:

La procedura di determinazione dell' HV richiede l'uso di una sorgente di Radon nota.

### **DESCRIZIONE DELLA SORGENTE**

La sorgente radioattiva in nostro possesso è il modello PYLON 3150 A. Questa, come abbiamo già detto, viene utilizzata per la calibrazione (calcolo del punto di lavoro) e per determinare l'efficienza. Oltre a queste funzioni la 3150 A è usata per verificare il punto di lavoro qualora la calibrazione sia stata già effettuata dai tecnici addetti alla manutenzione dello strumento.

Il modello 3150 A è simile sia nella forma (tubolare) che nelle caratteristiche dello scintillatore CPRD. L'unica differenza sta nel fatto che all'interno di questo è contenuta una sorgente radioattiva di Ra-226 in polvere. La sorgente è contenuta in un contenitore di alluminio in un'estremità del 3150 A ed è trattenuta tramite una fibra di vetro e un filtro di polietilene. Le parti interne dell'accessorio sono ricoperte dallo scintillatore ZnS(Ag) e sulla parte inferiore del tubo è presente una finestra di plexiglass la quale, in condizioni di non uso, è ricoperta da un tappo che protegge l'interno dalla luce. La connessione del 3150 A sull'AB-5 avviene sempre mediante l'adattatore ABA, facendo in modo che la finestra di plexiglass sia in corrispondenza del sensore del PMT.

Il Ra-226 decade in Ra-222. Questo a sua volta decade rilasciando particelle  $\alpha$  e prodotti di decadimento i quali a loro volta decadendo rilasciano altre particelle  $\alpha$ . Alcune delle  $\alpha$  rilasciate vengono convertite in impulsi luminosi dallo scintillatore. Poiché gli elementi presenti nella sorgente sono in equilibrio secolare, il Ra-226 genera nuovo Radon con la stessa attività con la quale il vecchio Radon già presente decade. Perciò il numero di particelle alfa generate al minuto è costante e lo sono anche gli impulsi di luce generati dallo scintillatore. Questi ultimi, passando dalla finestra di plexiglass, vengono amplificati dal PMT e conteggiati dall'AB-5 per intervalli di tempo. Il numero di impulsi generati per minuto è fornito dalla casa costruttrice e corrisponde a 3716 DPM ( Disintegration per minute). E' proprio grazie a questo valore che possiamo stimare l'efficienza dell'AB-5+CPRD che è definita come:

$$E = \text{CMP/DPM}$$

Dove CMP sono i conteggi per minuto effettuati dall'AB-5 con la 3150 A collegata e DPM è il valore fornitoci dalla casa costruttrice. Nel caso in cui l'AB-5 si trovi nelle condizioni del punto di lavoro l'efficienza avrà il suo valore massimo  $E_{\text{max}}=74,5\pm 2\%$  ( anche questo valore viene fornito dalla casa costruttrice). Se fissato il punto di lavoro sull'AB-5 questa condizione non è verificata, l'apparato necessita di una nuova calibrazione. Di tanto in tanto, tuttavia, si verifica un incremento del DPM della sorgente. Ciò è dovuto ad un incremento del Radium D (210). L'effetto del Radium D è la produzione di Po-210 con emissione di particelle  $\alpha$ . Qualora si verificasse questa situazione esiste una procedura che riconsente di ricalcolare l'esatto DPM della sorgente.

Una volta determinato il valore del DISC andiamo a procedere come segue:

- abbiamo connesso la sorgente nota (mod.3150A) all'AB-5 mediante l'adattatore ABA;
- abbiamo posizionato l'AB-5 in modalità CONT e stabilito un intervallo temporale di cinque minuti;
- regolata la manopola dell'HV al valore 0 abbiamo fatto contare l'AB-5 per tre intervalli;
- lo stesso procedimento del punto precedente è stato ripetuto per tutti i valori di HV da 0 a 10;

- in un grafico abbiamo riportato sull'asse delle X il valore di HV e sull'asse delle Y il CMP medio per ogni terna di misure (il CPM è dato dalla media dei tre conteggi diviso l'intervallo temporale; CMP sta per conteggi per minuto);
- Abbiamo così individuato nel grafico disegnato un plateau; in coincidenza del punto medio di questo plateau abbiamo preso sull'asse delle X il valore corrispondente di HV. (Si è scelto questo punto perché la parte del grafico che chiamiamo plateau presenta un andamento quasi costante dei dati, mentre alle estremità del plateau si trovano andamenti divergenti dei dati).

A questo punto abbiamo fissato l'HV trovato al valor medio del plateau abbiamo smontato la sorgente all' AB-5 e lo abbiamo fatto contare per tre intervalli di cinque minuti col tappo sul fotomoltiplicatore; fatta allora la media dei tre intervalli e calcolato il CPM abbiamo così trovato il valore di fondo (rumore elettronico + rumore del PMT).

Sono state ripetute le operazioni descritte precedentemente, per un valore più alto e uno più basso del DISC, ottenendo così tre diversi plateau.

Infine abbiamo scelto il grafico al quale corrispondeva il più basso valore di fondo e le migliori caratteristiche del plateau.

I valori di DISC e di HV corrispondenti a questo plateau determinano il punto operativo del sistema CPRD+AB-5.

Riportiamo qui di seguito le tabelle dei dati raccolti durante questa fase dell'esperienza con i corrispettivi grafici:

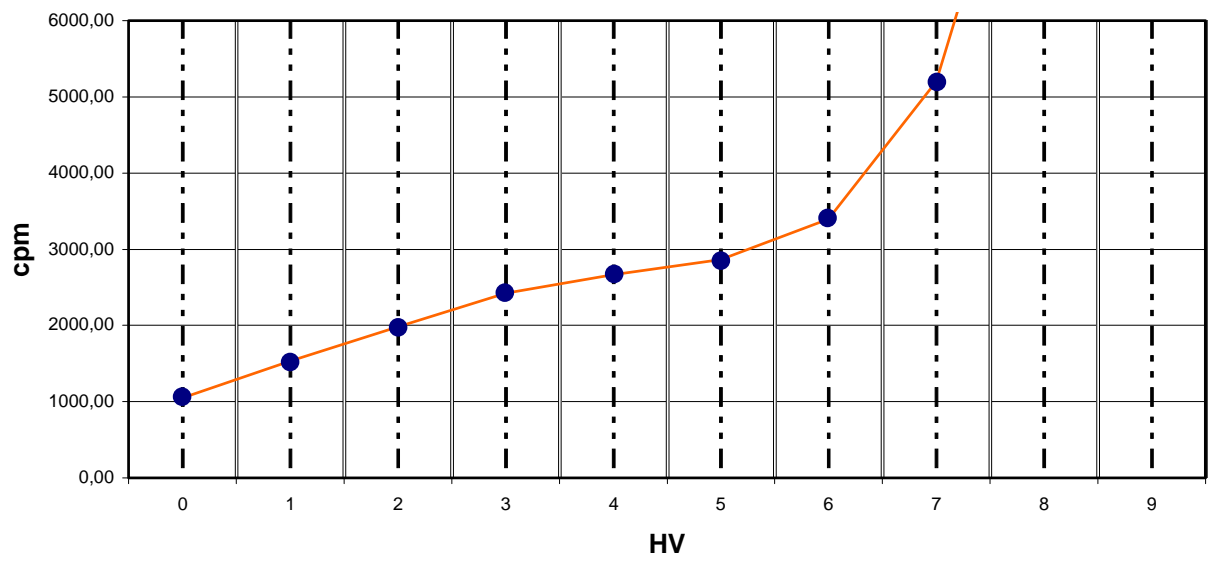
## MISURE DI HV

TABELLA 1						
DISC.value	HV value	counts1	counts2	counts3	av.counts	cpm
3,90	0	5305	5230	5280	5271,67	1052,11
3,90	1	7763	7527	7777	7689,00	1532,87
3,90	2	9976	9969	9788	9911,00	1977,87
3,90	3	11990	12084	12162	12078,67	2421,64
3,90	4	13861	13224	13347	13477,33	2669,89
3,90	5	14404	14294	14340	14346,00	2865,33
3,90	6	17166	16766	17149	17027,00	3396,13
3,90	7	25804	26465	25621	25963,33	5203,29
3,90	8	49035	49311	49297	49214,33	9854,82
3,90	9	138227	135953	132444	135541,33	26929,22
3,90	10	441719	440528	443648	441965,00	88409,40
TABELLA 2						
2,90	0	3905767	3908100	3908476	3907447,67	781601,58
2,90	1	3906645	3908431	3908372	3907816,00	781641,27
2,90	2	3905769	3907507	3907732	3907002,67	781482,78
2,90	3	3904647	3906188	3906041	3905625,33	781190,29
2,90	4	3897239	3901479	3902405	3900374,33	780283,89
2,90	5	3897994	3899946	3900158	3899366,00	779964,67
2,90	6	3894648	3896832	3897216	3896232,00	779352,00
2,90	7	3891246	3892441	3894251	3892646,00	778622,53
2,90	8	3890179	3891428	3893752	3891786,33	778464,42
2,90	9	3898289	3899279	3897324	3898297,33	779660,02
2,90	10	3962555	3962928	3963236	3962906,33	792604,69
TABELLA 3						
4,90	0	2371	2343	2279	2331,00	466,20
4,90	1	4466,00	4367,00	4267,00	4366,67	873,33
4,90	2	6579	6608	6547	6578,00	1315,60
4,90	3	9275	9389	9442	9368,67	1873,73
4,90	4	11772	11724	11781	11759,00	2351,80
4,90	5	13360	13456	13340	13385,33	2677,07
4,90	6	14082	14131	14179	14130,67	2826,13
4,90	7	14763	14462	14797	14674,00	2934,80
4,90	8	16714	16327	16483	16508,00	3301,60
4,90	9	26904	27224	27113	27080,33	5416,07
4,90	10	66031	65758	65777	65855,33	13171,0667

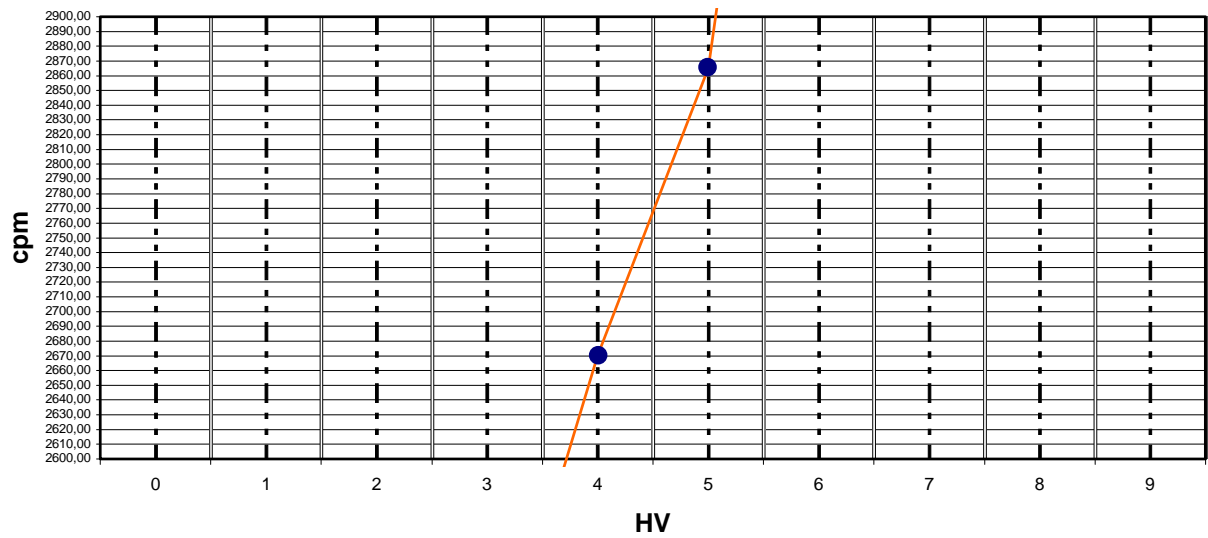
### MISURE DI BACKGROUND al punto medio

HV value	DISC	count1	count2	count3	av.count	cpm
4,5	3,9	4	1	2	2,3333333333	0,46666667
6	2,9	3904408	3907397	3905162	3905655,667	781131,133
6,5	4,9	9	2	2	4,3333333333	0,86666667

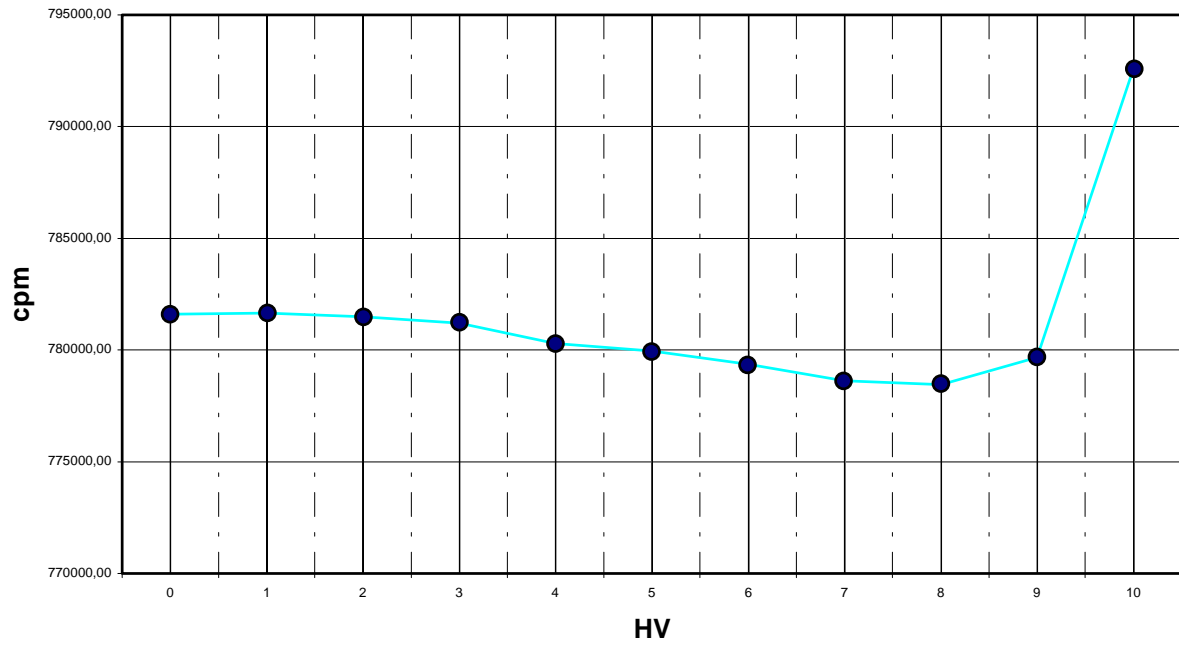
### PLATEAU (DISC 3,9)



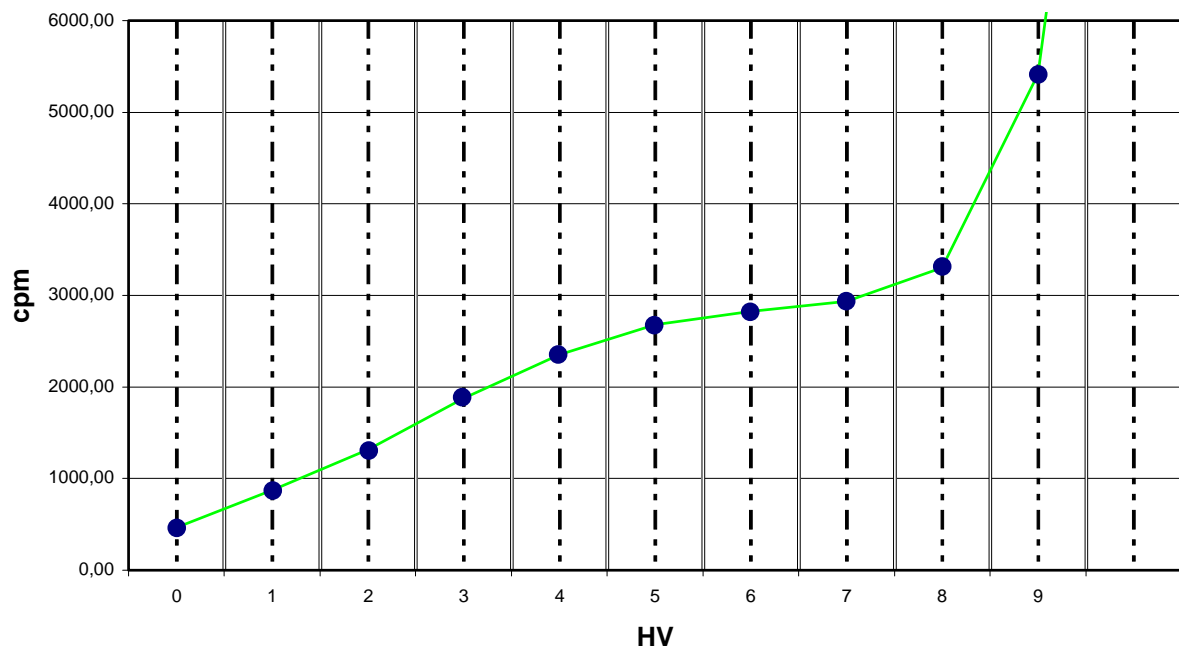
### PLATEAU (DISC 3,9)



PLATEAU (DISC 2.9)



PLATEAU (DISC 4,9)



A questo punto abbiamo fissato sullo strumento i valori di HV e di DISC corrispondenti a quelli trovati per il punto di lavoro. Montata sull'AB-5 la sorgente 3150 A abbiamo effettuato, in modalità CONT, tre conteggi in intervalli di 5 min. ciascuno. Dei tre conteggi è stata fatta la media aritmetica e tale media divisa per il valore dell'intervallo temporale fissato:

$$\text{CPM} = \langle \text{Conteggi} \rangle / 5 \text{ min.}$$

L'efficienza è stata trovata mediante la seguente relazione:

$$E = \text{CPM} / \text{DPM}$$

Dove DPM sono le disintegrazioni per minuto della sorgente (come descritto in precedenza). I valori del CPM e dell'Efficienza sono riportati nella tabella seguente:

operating point		Calcolo efficienza				
HV	DISC	HV	DISC	CPM	EFF	EFF %
4,5	3,9	4,5	3,9	2770	0,7454	74,54%

L'efficienza trovata è quella del sistema 3150 A+AB-5e corrisponde esattamente a quella del sistema CPRD+AB-5. Questo valore corrisponde all'efficienza totale del sistema scintillatore +PMT (dell'AB-5). Il valore fornitoci dalla casa costruttrice è EFF= 74,5±2 % e, come si può vedere dalla tabella, il valore dell'efficienza trovato risulta in completo accordo con questo.

**Si può concludere che il punto di lavoro trovato corrisponde con quello indicato nel certificato di calibrazione e che, quindi, come ipotizzato, la calibrazione può essere considerata ancora valida sebbene scaduta.**

Affinché lo strumento possa essere utilizzato per misurare concentrazioni di Radon mancano ancora i valori della sensibilità e del rumore ambientale.

## 5.4 SENSIBILITA' E RUMORE DI FONDO

Anche questi due parametri vengono indicati dal certificato di calibrazione. Verificata la calibrazione, abbiamo potuto considerare questi parametri validi cioè:

$$S = 0,0408 \text{ CPM}/(\text{Bq}/\text{m}^3)$$

$$\text{BG} = 0,54 \text{ CPM}$$

Il BG è il valore del rumore di fondo rilevato dal set CPRD+AB-5 in assenza di gas Radon nelle condizioni del punto di lavoro. Questo valore quando lo strumento è calibrato ha come

limite massimo 0,75 CPM. In base al valore del BG possiamo calcolare il NEP dello strumento:

$$NEP = BG/S = 13,2 \text{ Bq/m}^3.$$

La sensibilità è uno speciale valore che consente di compensare, nei conteggi effettuati durante le misure, le perdite dovute alle particelle  $\alpha$  non rilevate dallo scintillatore.

Entrambi i valori servono, una volta effettuati i conteggi nelle misurazioni (con l'AB-5+CPRD), a determinare le concentrazioni di Radon mediante la seguente relazione:

$$C = \frac{CPM - BG}{S}$$

C = concentrazione

Da questa si può capire che il ruolo secondario di S è quello di convertire i conteggi per minuto (CPM) in concentrazioni (in pCi/l oppure in Bq/m<sup>3</sup>). Infatti le dimensioni di S sono in CPM/pCi/l oppure in CPM/Bq/m<sup>3</sup>.

Se le misurazioni vengono effettuate in modalità CONT, tutti i risultati devono essere elaborati mediante la precedente formula affinché si possano stimare le concentrazioni di Radon.

Invece, se le misurazioni si fanno in modalità RADON l'AB-5 calcola direttamente le concentrazioni (come spiegato nel par.4.1.4 al punto 4) in base ai valori di S e di BG programmati. La formula secondo la quale l'AB-5 calcola, in modalità Radon, le concentrazioni di Radon alla fine di ogni intervallo è quella precedente.

Affinché l'apparato possa essere utilizzato per effettuare misure di Radon anche in modalità RADON abbiamo memorizzato questi i valori di questi parametri nell'AB-5 seguendo la procedura indicata nel par.4.1.6 punto (ii).

## 6. MISURAZIONI

Tutte le operazioni eseguite in precedenza sono servite a rendere l'apparato operativo. Fatto ciò infatti l'AB-5 può essere utilizzato per effettuare misure di Radon in ambienti chiusi.

### 6.1 PROCEDURA GENERALE PER EFFETTUARE MISURE

Prima di andare ad effettuare le misure bisogna assicurarsi che la batteria interna dell'AB-5 sia carica e che il CPRD non sia stato utilizzato per almeno 24 ore. Le procedure da noi utilizzate per effettuare le misurazioni sono le seguenti:

#### **In modalità RADON:**

Dopo aver montato il CPRD sull'AB-5 si sceglie la modalità RADON e si accende l'AB-5. Si seleziona l'intervallo di tempo desiderato nel quale il contatore effettua i conteggi ( $\geq 1$  ora) e ci si assicura che siano stati inseriti correttamente i valori di BG e di S. Si fanno partire i conteggi mediante il pulsante START/STOP e si lascia l'apparecchio contare per un numero di ore superiore a quattro. Il contatore fornisce le concentrazioni di Radon per ogni intervallo di tempo e la media delle concentrazioni totali. Le misure significative sono quelle ottenute dopo le prime 3 ore e mezza di conteggi poiché questo periodo temporale serve a far sì che all'interno del CPRD si instauri l'equilibrio secolare fra il Radon e i suoi discendenti (ciò accade se e solo se nell'ambiente in cui l'apparecchio va a misurare si è già instaurato l'equilibrio secolare).

#### **In modalità CONT:**

Dopo aver montato il CPRD sull'AB-5 si sceglie la modalità CONT e si accende l'AB-5. Si seleziona l'intervallo di tempo desiderato nel quale il contatore effettua i conteggi. Si fanno partire i conteggi mediante il pulsante START/STOP e si lascia l'apparecchio contare per un numero di ore superiore a quattro. Il contatore fornisce i conteggi per ogni intervallo di tempo tramite i quali noi andremo a calcolare le concentrazioni. Le misure significative sono quelle ottenute dopo le prime 3 ore e mezza di conteggi poiché questo periodo temporale serve a far sì che all'interno del CPRD si instauri l'equilibrio secolare fra il



Radon e i suoi discendenti (ciò accade se e solo se nell'ambiente in cui l'apparecchio va a misurare si è già instaurato l'equilibrio secolare).

### **6.1.1 ACCORGIMENTI**

Come già spiegato l'apparato può effettuare misure in luoghi chiusi ove si sia stabilito l'equilibrio radioattivo fra il Radon e i suoi discendenti, per cui, una volta individuato il luogo in cui effettuare le misure, ci siamo assicurati

- che le finestre e le porte siano state chiuse per almeno 12 ore prima dell'inizio della misura e durante le misure stesse;
- che i condizionatori d'aria fossero spenti;
- che le condizioni meteorologiche fossero stazionarie (in assenza di venti o burrasche);
- che l'apparecchio non fosse posizionato nelle vicinanze di porte, finestre o sorgenti di calore;
- che l'apparecchio fosse posizionato ad un'altezza di almeno 50 cm dal pavimento;
- che il periodo di monitoraggio fosse di almeno 8 ore (questo perché più lungo è il periodo nel quale vengono effettuate le misure, migliori saranno le misure).

## **6.2 LE MISURE**

Abbiamo effettuato due serie di misure presso due diversi locali siti all'interno del Dipartimento di Fisica. Le misure sono riportate nelle due tabelle che seguono. La prima tabella (tabella 1) riguarda la serie di misure effettuate presso il cubo 33 C al piano terra all'interno di una stanza priva di finestre e di dimensioni alquanto limitate. La seconda tabella (tabella 2) riguarda la serie di misure effettuate presso il cubo 31 C al sesto piano all'interno di un ufficio del Dipartimento di Fisica dell'Ambiente. Tale ufficio presenta due aperture verso l'esterno: una porta e una finestra. Abbiamo scelto questi locali perché entrambi sono non utilizzati, quindi non frequentati, tenuti quasi sempre chiusi, e perciò non soggetti a ventilazione.

Nelle tabelle è stata calcolata  $\langle C \rangle$  (concentrazione media) utilizzando i conteggi che cadono negli intervalli successivi alle prime cinque ore di misure.

Nelle tabelle in modalità CONT i valori di  $\langle C \rangle$  sono stati da noi calcolati mentre nelle tabelle in modalità Radon sono stati riportati i dati così come stampati sul printout della stampante PPT-1. La  $\sigma C$  indicata in tabella rappresenta la deviazione standard dalla media.

N° intervallo	conteggi	CPM	Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )		
1	73	2,43	46,41		
2	55	1,83	31,70		
3	51	1,70	28,43		
4	48	1,60	25,98		
5	35	1,17	15,36		
6	46	1,53	24,35		
7	50	1,67	27,61		
8	45	1,50	23,53		
9	33	1,10	13,73		
10	38	1,27	17,81		
11	54	1,80	30,88	$\langle C \rangle$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$\sigma C$ (Bq/m <sup>3</sup> )
12	57	1,90	33,33	30,79	1,98
13	53	1,77	30,07		
14	54	1,80	30,88		
15	58	1,93	34,15		
16	50	1,67	27,61		
17	54	1,80	30,88		
18	53	1,77	30,07		
19	52	1,73	29,25		

TABELLA 1B

MODO CONT (Lunghezza intervallo temporale 30 min)

N° intervallo	conteggi	CPM	Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )		
1	80	2,67	52,12		
2	56	1,87	32,52		
3	46	1,53	24,35		
4	48	1,60	25,98		
5	27	0,90	8,82		
6	43	1,43	21,90		
7	51	1,70	28,43		
8	48	1,60	25,98		
9	32	1,07	12,91		
10	37	1,23	16,99		
11	54	1,80	30,88	$\langle C \rangle$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$\sigma C$ (Bq/m <sup>3</sup> )
12	58	1,93	34,15	30,96	2,51
13	52	1,73	29,25		
14	57	1,90	33,33		
15	51	1,70	28,43		
16	55	1,83	31,70		
17	59	1,97	34,97		
18	53	1,77	30,07		
19	52	1,73	29,25		
20	50	1,67	27,61		

TABELLA 1C

MODO RADON (Lunghezza intervallo temporale 1 ora)

N° intervallo	conteggi	CPM	Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )		
• 1	107	1,78	30,47		
• 2	115	1,92	33,74		
• 3	140	2,33	43,95		
4	102	1,70	28,43	$\langle C \rangle$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$\sigma C$ (Bq/m <sup>3</sup> )
5	111	1,85	32,11	32,16	2,71
6	121	2,02	36,19		
7	108	1,80	30,88		
8	112	1,87	32,52		
9	120	2,00	35,78		
10	110	1,83	31,70		
11	105	1,75	29,66		

TABELLA 2A

MODO CONT (Lunghezza intervallo temporale 30 min)

N° intervallo	conteggi	CPM	Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )		
1	68	2,27	42,32		
2	52	1,73	29,25		
3	56	1,87	32,52		
4	32	1,07	12,91		
5	25	0,83	7,19		
6	47	1,57	25,16		
7	19	0,63	2,29		
8	43	1,43	21,90		
9	29	0,97	10,46		
10	52	1,73	29,25		
11	44	1,47	22,71	<C> (Bq/m <sup>3</sup> )	σC (Bq/m <sup>3</sup> )
12	46	1,53	24,35	22,80	1,80
13	43	1,43	21,90		
14	44	1,47	22,71		
15	48	1,60	25,98		
16	40	1,33	19,44		
17	44	1,47	22,71		
18	43	1,43	21,90		
19	45	1,50	23,53		

TABELLA 2B

MODO CONT (Lunghezza intervallo temporale 30 min)

N° intervallo	conteggi	CPM	Conc. (Bq/m <sup>3</sup> )		
1	69	2,30	43,14		
2	54	1,80	30,88		
3	48	1,60	25,98		
4	38	1,27	17,81		
5	51	1,70	28,43		
6	46	1,53	24,35		
7	69	2,30	43,14		
8	35	1,17	15,36		
9	18	0,60	1,47		
10	21	0,70	3,92		
11	41	1,37	20,26	<C> (Bq/m <sup>3</sup> )	σC (Bq/m <sup>3</sup> )
12	47	1,57	25,16	22,44	2,38
13	42	1,40	21,08		
14	48	1,60	25,98		
15	41	1,37	20,26		
16	45	1,50	23,53		
17	46	1,53	24,35		
18	43	1,43	21,90		
19	40	1,33	19,44		

TABELLA 2C

MODO RADON (Lunghezza intervallo temporale 1 ora)

N° intervallo	conteggi	CPM	Concentrazione (Bq/m <sup>3</sup> )		
• 1	105	1,75	29,66		
• 2	139	2,32	43,55		
• 3	90	1,50	23,53		
4	89	1,48	23,12	<C> (Bq/m <sup>3</sup> )	σC (Bq/m <sup>3</sup> )
5	94	1,57	25,16	23,89	1,35
6	86	1,43	21,90		
7	90	1,50	23,53		
8	88	1,47	22,71		
9	96	1,60	25,98		
10	93	1,55	24,75		
11	91	1,52	23,94		

## 6.3 CONCLUSIONI

Considerato che l'area geologica non è a rischio per quanto riguarda il problema del RADON, come risulta dalle carte in possesso al Dip. di Geologia, i dati ottenuti nelle nostre misure rispecchiano nettamente questa tendenza. Le misure effettuate presso il cubo 33 C al piano terra risultano leggermente più alte rispetto a quelle eseguite presso il cubo 31 C al sesto piano. Questa leggera discrepanza potrebbe essere dovuta alla differenza di altezza dal suolo dei due siti.

Entrambe le misure risultano essere, comunque, al di sotto del livello minimo stabilito dalle linee guida dell'EPA (Environmental Protection Agency: agenzia federale del governo degli USA responsabile in materia) che sono:

- Sotto i 148 Bq/m<sup>3</sup>: il rischio è nullo;
- Da 148 a 740 Bq/m<sup>3</sup>: si raccomandano azioni di riduzione del livello a 148 Bq/m<sup>3</sup> nell'arco di pochi anni;
- Da 740 a 7400 Bq/m<sup>3</sup>: si raccomandano azioni di riduzione del livello nell'arco di qualche mese;
- Da 7400 Bq/m<sup>3</sup>: si raccomandano azioni di riduzione del livello nell'arco di qualche settimana.

Dobbiamo inoltre sottolineare che nelle misure da noi effettuate non abbiamo preso in considerazione il tipo di materiali usati nella costruzione degli edifici nei quali i due siti sono locati.

## APPENDICE

### FATTORI DI CONVERSIONE

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

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dis/sec}$$

$$1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{-2} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ pCi/l} = 37 \text{ Bq/m}^3$$

$$1 \text{ pCi} = 3,7 \times 10^{-2} \text{ dis/sec} = 2,2 \text{ dis/min} = 2,2 \text{ dpm}$$

$$1 \frac{\text{CPM}}{\text{pCi/l}} = 0,027 \frac{\text{CPM}}{\text{Bq/m}^3}$$

## BIBLIOGRAFIA

- [1] prof. E. Lamanna (Dip.Fisica UNICAL) **Appunti del corso di Fisica Nucleare e subnucleare;**
- [2] prof. G. Falcone (Dip.Fisica UNICAL) **Appunti del corso di Radioprotezione;**
- [3] M.Lenzen, H.J. Neugebauer **A theoretical investigation in the Lucas Cell**, "Nuclear Instruments and Methods in Physics research" A 368(1996) 479-483;
- [4] D.Pressyanov, J.Buysse, A.Van Deynse, A. Poffijn, G.Meesen **Indoor radon detected by compact disc**, "Nuclear Instruments and Methods in Physics research" A 457 (2001) 665-666;
- [5] S.Piermattei,G.C.Venuti **The behaviour of radon indoor air and possible strategies for controlling indoor pollution;**
- [6] K.Jamil, Fazal-ur-Rehman, Safdar Ali, H.A.Khan **Determination of equilibrium factor between radon and its progeny using surface barrier detector for various shapes of passive radon dosimeters**, , "Nuclear Instruments and Methods in Physics research" A 388 (1997) 267-272;
- [7] J.K.C.Leung, C.W.Ho, M.Y.W.Tso **Deposition behaviour of <sup>222</sup>Rn progeny on surfaces**, "Nuclear Instruments and Methods in Physics research" A 443 (2000) 546-556;
- [8] A.C.George, N. Bredhoff **The present status of the radon program in the United States of America**, "The Science of the Total Environment" 272 (2001) 245-246;
- [9] Pylon model AB-5 **Instruction Manual**, Pylon electronic Inc., Rev.5 June 1993;
- [10] Pylon model CPRD **Instruction Manual**, Pylon electronic development company, Ltd., Rev. 0 December 1989.