

M.M.Electronics - <http://www.mmetft.it>



Michele Marino - [mmelectronics@mmetft.it](mailto:mmelectronics@mmetft.it)

## **Sui tubi di Geiger-Muller**

V 0.1

Ottobre 2013

## INFORMATIVA

Come prescritto dall'art. 1, comma 1, della legge 21 maggio 2004 n.128, l'autore avvisa di aver assolto, per la seguente opera dell'ingegno, a tutti gli obblighi della legge 22 Aprile del 1941 n. 633, sulla tutela del diritto d'autore. Tutti i diritti di questa opera sono riservati. Ogni riproduzione ed ogni altra forma di diffusione al pubblico dell'opera, o parte di essa, senza un'autorizzazione scritta dell'autore, rappresenta una violazione della legge che tutela il diritto d'autore, in particolare non ne è consentito un utilizzo per trarne profitto. La mancata osservanza della legge 22 Aprile del 1941 n. 633 è perseguibile con la reclusione o sanzione pecuniaria, come descritto al Titolo III, Capo III, Sezione II. A norma dell'art. 70 è comunque consentito, per scopi di critica o discussione, il riassunto e la citazione, accompagnati dalla menzione del titolo dell'opera e dal nome dell'autore.

## AVVERTENZE

Chiunque decida di far uso delle nozioni riportate nella seguente opera o decida di realizzare i circuiti proposti, è tenuto pertanto a prestare la massima attenzione in osservanza alle normative in vigore sulla sicurezza.

L'autore declina ogni responsabilità per eventuali danni causati a persone, animali o cose derivante dall'utilizzo diretto o indiretto del materiale, dei dispositivi o del software presentati nella seguente opera.

Si fa inoltre presente che quanto riportato viene fornito così com'è, a solo scopo didattico e formativo, senza garanzia alcuna della sua correttezza.

L'autore ringrazia anticipatamente per la segnalazione di ogni errore.

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Sul tubo di Geiger-Muller</b>	<b>4</b>
2.1	Inizio della scarica . . . . .	6
2.2	Collasso della scarica . . . . .	7
2.3	Recupero della scarica . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Caratteristiche del tubo GM</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Tempo morto e di recupero</b>	<b>9</b>
4.1	Tempo morto . . . . .	9
4.2	Riduzione del tempo morto . . . . .	10
4.3	Tempo di recupero . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Risposta alla radiazione</b>	<b>10</b>
5.1	Particelle $\alpha$ . . . . .	11
5.2	Particelle $\beta$ . . . . .	11
5.3	Raggi $x$ a bassa energia . . . . .	11
5.4	Raggi $\gamma$ e $x$ ad alta energia . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Radiazioni ionizzanti</b>	<b>13</b>
7.1	Grandezze di misura: IE . . . . .	13
7.2	Grandezze di misura: II . . . . .	13
7.3	Esposizione da fondo naturale . . . . .	14
	<b>Bibliografia</b>	<b>15</b>

## Elenco delle figure

1	Struttura tubo Geiger-Muller . . . . .	4
2	Connessione anodo e catodo . . . . .	5
3	Regioni di funzionamento . . . . .	6
4	Curva caratteristica semplificata . . . . .	7
5	Tempo morto e tempo di recupero . . . . .	9
6	Numero di impulso vs dose rate . . . . .	10
7	Tubo GM SBM-20 . . . . .	12

## 1 Introduzione

L'articolo espone una breve trattazione sui rivelatori di particelle radiative conosciuti come tubi di Geiger-Muller (GM). Verranno analizzate le realizzazioni strutturali, le caratteristiche e i problemi legati all'utilizzo di tali rivelatori. A seguire un cenno sulle particelle rilevabili dai tubi GM e infine, un'appendice dedicata alle grandezze per la misura e un confronto sui livelli di radioattività.

## 2 Sul tubo di Geiger-Muller

Il tubo di Geiger-Muller (GM) è un rivelatore di radiazioni utilizzato su larga scala, con particolare riferimento ai luoghi interessati da particelle radioattive. Consente di rilevare e misurare i seguenti tipi di radiazione:

- particelle  $\alpha$ ;
- particelle  $\beta$ ;
- raggi  $x$ ;
- raggi  $\gamma$ .

Un tubo GM è composto da un anodo e un catodo racchiusi in un contenitore metallico al cui interno è presente un gas a bassa pressione ( $0,07 \div 0,13\text{Bar}$ ). Su una delle estremità o sul lato del tubo, è presente una speciale finestra trasparente alle radiazioni.

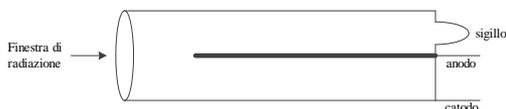


Figura 1: Struttura tubo Geiger-Muller

La struttura di figura 1 consente un elevato campo elettrico quando viene applicata la tensione necessaria a generarlo, ciò che rende possibile la richiesta propagazione con moltiplicazione di ioni a valanga all'interno del tubo. Il disegno di un tubo GM, solitamente, è ottimizzato per un'applicazione specifica, per cui si hanno differenze considerevoli in forma, dimensione, gas, pressione del gas e finestra di radiazione. Il tipo di costruzione varia in linea di massima in base alle radiazioni da rilevare:

- particelle  $\alpha$  e  $\beta$  a bassa energia: il tubo viene sigillato ad un'estremità da una sottile finestra in mica dalla quale entra la radiazione;
- particelle  $\beta$  ad alta energia: il disegno è simile al precedente con l'unica differenza che lo spessore della finestra in mica è maggiore;
- raggi  $x$  a bassa energia: il tubo è simile ai precedenti con la differenza di essere più lungo al fine di migliorare l'assorbimento della radiazione. Inoltre, lo spessore della finestra in mica è maggiore. Il gas utilizzato è un gas pesante come l'argon o il krypton e la pressione è superiore a quella di altri tipi di tubi ( $0,8 \div 0,87\text{Bar}$ );
- radiazione  $\gamma$ : è sprovvisto di finestra ed è composto da pareti metalliche spesse. La maggior parte degli impulsi in questi tubi, sono prodotti da elettroni ad alta energia che vengono generati nelle pareti del tubo attraverso fotoemissioni<sup>1</sup>. Questi elettro-

<sup>1</sup>In fisica, emissione di radiazioni elettromagnetiche o di particelle da parte di un corpo investito da radiazioni elettromagnetiche.

ni interagiscono col gas e innescano la scarica.

Per ottenere la massima sensibilità, il tubo GM viene presentato trasversalmente rispetto alla sorgente della radiazione. I rivelatori immersi in gas, consistono banalmente in due elettrodi immersi in una camera con gas a bassa pressione. Le pareti della camera sono realizzate in maniera tale da permettere la penetrazione della radiazione da rilevare.

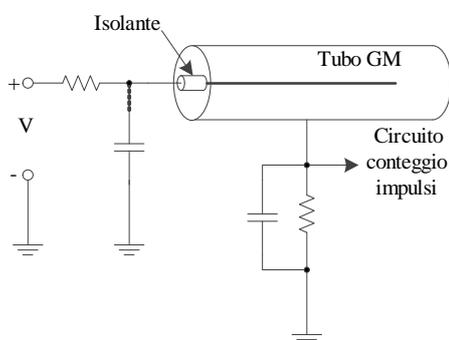


Figura 2: Connessione anodo e catodo

La tensione viene applicata tra il catodo e l'anodo e la corrente nel circuito esterno viene governata dalla conducibilità del gas all'interno del tubo e, conseguentemente, dalla sua ionizzazione<sup>2</sup>. Se nessuna delle molecole di gas viene ionizzata, il gas si comporta come un isolante e nessuna corrente scorre nel circuito. Se qualche molecola di gas viene ionizzata da una particella o da un quanto di radiazione che ha attraversato la camera, la corrente inizia a fluire. Gli eventi im-

<sup>2</sup>La ionizzazione consiste nella generazione di uno o più ioni a causa della rimozione o addizione di elettroni da una entità molecolare neutra (cioè atomi o molecole), che può essere causata da collisioni tra particelle o per assorbimento di radiazioni.

mediatamente successivi, dipendono dal campo elettrico presente tra gli elettrodi:

- se il campo elettrico è debole, i nuovi ioni ed elettroni si ricombinano;
- se il campo è sufficientemente elevato, gli ioni e gli elettroni si separano completamente, essendo attratti dagli elettrodi. Gli ioni che reagiscono col catodo saranno neutralizzati dagli elettroni dello stesso catodo. Questo trasferimento di elettroni e l'arrivo di elettroni dall'anodo, generano un impulso di corrente nel circuito esterno. Ammesso che un numero sufficiente di ioni ed elettroni arrivino più o meno simultaneamente, l'impulso di corrente può essere rivelato misurando la caduta di tensione associata, sulla resistenza del circuito esterno.

La figura 3 mostra la curva caratteristica qualitativa dei sensori a gas con particelle  $\alpha$ . La forma di queste curve è determinata, in qualche misura, da:

- il progetto del rivelatore;
- il gas utilizzato;
- la pressione del gas.

In generale, al crescere della tensione applicata agli elettrodi, si individuano cinque regioni.

Regione 1: il basso campo elettrico in questa regione ha effetti trascurabili. Molti ioni si ricombinano e la corrente è trascurabile. Solitamente i sensori non si utilizzano in questa regione.

Regione 2: gli ioni e gli elettroni separati, sono forzati alla deriva verso gli elettrodi e, poiché la ricombinazione è

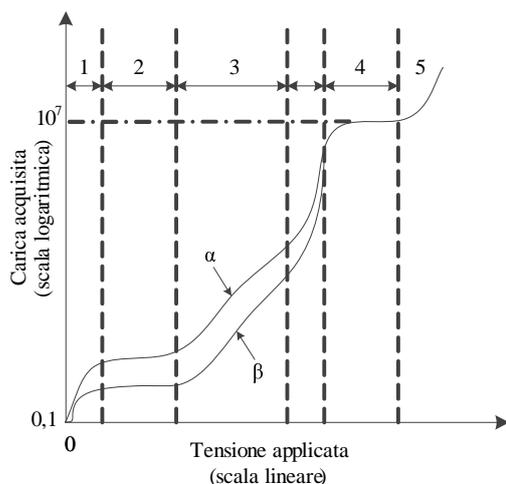


Figura 3: Regioni di funzionamento

prevenuta o ritardata, molti raggiungono gli elettrodi. La corrente generata in questa regione dipende, quasi esclusivamente, dal numero di ioni generati dalla radiazione ed è quasi indipendente dall'esatto valore della tensione applicata agli elettrodi. Le camere ionizzanti<sup>3</sup> lavorano in queste regioni.

Regione 3: gli elettroni vengono accelerati ad alta velocità dal campo elettrico presente nella camera e producono ioni secondari per collisione, con conseguente moltiplicazione di carica. Le particelle che si muovono attraverso la camera, producono corrente e conseguentemente tensioni elevate (impulsi). L'ampiezza di tali impulsi è proporzionale all'energia della particella ionizzante. I contatori proporzionali operano in questa regione.

Regione 4: la moltiplicazione di ioni si aggrava e, nella conseguente valanga, virtualmente tutti gli elettroni primari e se-

<sup>3</sup>La camera di ionizzazione è un dispositivo per il rilevamento di agenti ionizzanti, di particelle cariche e degli spettri di energia di radiazioni elettromagnetiche.

condari hanno un'accelerazione sufficiente per creare ulteriori ioni di seconda e terza generazione. In queste condizioni, non è più possibile distinguere i differenti tipi di radiazione e le differenti energie correlate, mentre la sensibilità di rivelazione è eccellente. I tubi GM operano in questa regione che viene identificata con il nome GM plateau.

Regione 5: un ulteriore aggravio dell'effetto valanga, produce una ionizzazione totale del gas tra gli elettrodi. Una scarica auto-sostenuta, che continua fintanto che la tensione è applicata, può dar luogo ad un singolo impulso. Il funzionamento in questa regione può essere dannoso per il rivelatore e lunghe operazioni in questa regione sono da evitare.

Nonostante le variazioni nella costruzione, tutti i tubi GM sono progettati per lavorare nelle condizioni dettate dalla regione 4. Di seguito le varie fasi di funzionamento dei tubi GM.

## 2.1 Inizio della scarica

Quando una particella o un quanto di energia entra in contatto col gas (neon, argon, elio, krypton), potrebbe aver inizio una qualche forma di ionizzazione che crea elettroni e ioni positivi. Se al tubo è applicata la corretta tensione operativa, gli elettroni del gas vicini all'anodo e gli ioni positivi vicini al catodo, vengono concentrati quasi istantaneamente. Gli ioni e gli elettroni rimanenti, insieme al prodotto della moltiplicazione degli ioni, segue una rapida successione. La corrente risultante genera un impulso di tensione molto ripido sulla resistenza serie e, l'impulso può essere contato attraverso il circuito esterno di conteggio.

## 2.2 Collasso della scarica

La maggior parte della scarica viene fornita dalla capacità intrinseca e dalle capacità parassite del tubo. Quando queste vengono scaricate significativamente, il tubo collassa e segue la deionizzazione del gas. Mentre la deionizzazione ha luogo, la ricarica delle capacità impone un andamento esponenziale in discesa all'impulso di tensione, la cui pendenza dipende dalla costante RC.

## 2.3 Recupero della scarica

Quando la scarica primaria è completa, gli ioni positivi residui derivano verso il catodo e si ricombinano con gli elettroni presenti sulla superficie dell'elettrodo. Gli ioni positivi in prossimità dell'anodo indeboliscono temporaneamente l'intensità del campo elettrico e questo riduce la sensibilità del tubo per un breve intervallo di tempo dopo ogni scarica. In realtà, gli ioni residui, invece di ricombinarsi, potrebbero dare luogo ad una nuova generazione di elettroni che, accelerati con un alto contenuto di energia di collisione, potrebbero dar luogo a ripetizioni spurie del processo di scarica. Per agevolare la ricombinazione, solitamente, si aggiunge un altro gas (quenching gas) con un potenziale ionizzante più basso del gas principale.

## 3 Caratteristiche del tubo GM

Vediamo ora una versione semplificata della curva caratteristica di un tubo GM. La caratteristica è ottenuta disegnando il numero di impulsi al secondo in funzione della tensione fra gli elettrodi, in un campo radiativo costante.

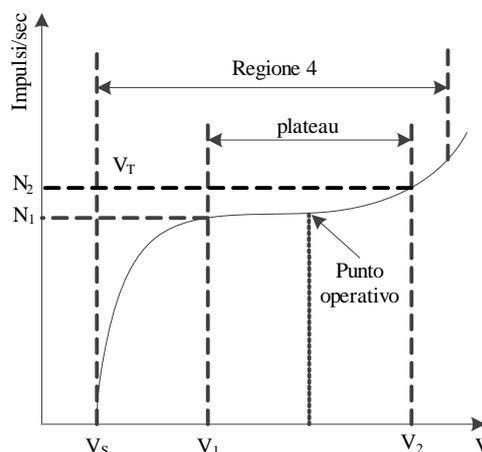


Figura 4: Curva caratteristica semplificata

- **Tensione bassa:** Per tensioni molto basse, il numero di impulsi è insignificante. Generalmente il tubo non può operare in questa regione.
- **Tensione iniziale:** La tensione di partenza  $V_s$  è definita come la più bassa tensione applicata al tubo, per la quale gli impulsi possono essere rivelati da un sistema con caratteristiche ben definite. Il valore di  $V_s$  varia in base al tubo, ma è generalmente compreso tra 350V e 500V.
- **Tensione di soglia:** Oltre la tensione di partenza, il numero di impulsi cresce rapidamente. La tensione viene incrementata in un range compreso tra 50V e 100V fino a raggiungere la tensione di soglia  $V_T$ . Al di sopra di  $V_T$ , tutti gli eventi ionizzanti distinguibili, producono impulsi della stessa dimensione. La carica concentrata sull'anodo per evento ionizzante, è sostanzialmente indipendente dal numero di ioni originariamente creati.

- **Plateau:** La regione di plateau ha inizio in corrispondenza di  $V_T$  e si estende per circa 100V. Il largo range di tensione e il suo basso gradiente, consentono una misura accurata dell'intensità di radiazione, senza la necessità di un'alimentazione di potenza stabilizzata.

La relazione per la valutazione della regione di plateau è data dalla seguente equazione:

$$\text{larghezzaPlateau :} \\ V_2 - V_1 [V] \quad (1)$$

$$\text{pendenzaPlateau :} \\ \left( \frac{N_2 - N_1}{\frac{1}{2}(N_2 + N_1)} \right) \left( \frac{100}{V_2 - V_1} \right) \left[ \frac{\%}{V} \right] \quad (2)$$

La ridotta pendenza positiva della regione di plateau è causata dai seguenti fattori:

1. l'incremento di tensione allunga leggermente il volume attivo del tubo GM (la regione spaziale dove gli ioni si trovano in un adeguato campo elettrico tale da assicurare la possibilità di dar luogo ad una scarica a valanga). Il numero di impulsi cresce per una data intensità di radiazione;
2. poiché anche le scariche nel gas ausiliario (quenching gas) lasciano qualche carica residua o molecola in uno stato eccitato, rimane la possibilità di induzione per una seconda scarica. La probabilità di questa occorrenza è bassa, ma cresce all'aumentare della tensione. Il ridotto numero di impulsi spuri si aggungeranno, in

piccola parte, al numero di impulsi iniziale, contribuendo alla pendenza del plateau.

- **Instabilità oltre il plateau:** oltre il plateau, c'è un brusco incremento nel numero di impulsi. La relazione tra il numero di impulsi e l'intensità della radiazione non è più lineare. Il circuito diventa instabile e si potrebbero innescare oscillazioni.
- **Connessione del segnale di uscita:** in teoria il segnale di uscita di un tubo GM può essere prelevato attraverso una rete RC connessa sull'anodo o sul catodo. Analizziamo entrambi i casi:

1. connessione al catodo (preferita): è la connessione preferita perché è quella che ha meno effetti sulle caratteristiche del tubo GM. La capacità extra del circuito di uscita aggiunta al catodo è considerevolmente meno significativa rispetto all'aggiunta sul piccolo circuito dell'anodo. Inoltre, è possibile evitare l'utilizzo di condensatori ad alta tensione che sono generalmente richiesti per il circuito di anodo;
2. connessione sull'anodo: la capacità del circuito, aggiunta alla piccola capacità dell'elettrodo dell'anodo, può provocare effetti indesiderati. Per questo motivo viene utilizzata solo quando è strettamente necessario (per esempio quando il catodo richiede, necessariamente, la connessione verso massa).

Per concludere, con una tensione di pilotaggio al centro della regione di plateau, il numero di impulsi è sostanzialmente indipendente dalla tensione applicata. Questo vale per tutta l'estensione del plateau fintanto che il tubo operi in un campo di radiazione uniforme.

#### 4 Tempo morto e di recupero

Le prestazioni massime di conteggio di un tubo sono determinate da due caratteristiche temporali interconnesse. Queste sono il tempo morto e il tempo di recupero che hanno luogo nel periodo immediatamente successivo ad una scarica completa.

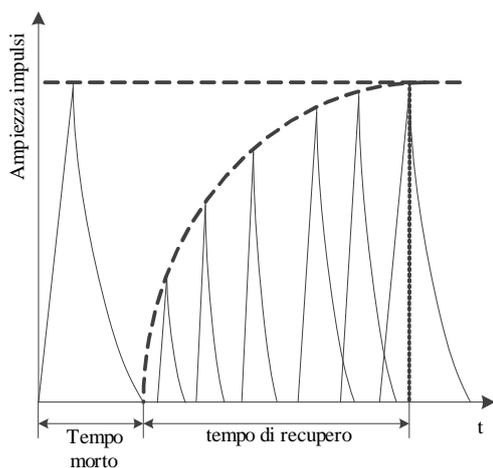


Figura 5: Tempo morto e tempo di recupero

##### 4.1 Tempo morto

È quello che ha maggiore influenza sul tempo di recupero totale ed è un breve intervallo temporale che segue la scarica durante il quale, il tubo GM è incapace di rispondere a qualsiasi successivo

evento ionizzante. Questo breve periodo persiste fintanto che la capacità effettiva viene caricata nuovamente. Normalmente, durante questo intervallo di tempo, la maggior parte degli ioni positivi residui, viene raggruppata dal campo elettrico. Tuttavia il campo è troppo basso per consentire un'altra scarica, anche se sono presenti ulteriori eventi ionizzanti.

Il tempo morto varia con la tensione applicata. Solitamente, la soluzione ottimale consiste nell'imporre una tensione al centro del plateau, fissando la soglia di conteggio degli impulsi al 10% dell'ampiezza massima degli impulsi. Il tempo morto dopo ogni scarica ionizzata, limita la massima frequenza di conteggio degli impulsi perché ogni evento che avviene in questo breve periodo non fornisce alcun conteggio. La relazione tra il tempo morto  $\tau$ , il conteggio reale  $N_1$  e quello misurato  $N$ , è dato da:

$$N_1 = \frac{N}{1 - N\tau} \quad (3)$$

valida solo quando  $N\tau \ll 1$ .

Quando siamo in presenza di radiazioni ad alto dose rate<sup>4</sup>, la probabilità che un evento avvenga durante il tempo morto è alta, per cui un numero significativo di impulsi viene perso. Il tempo morto di un tubo ha un maggiore effetto di mercato sulle prestazioni dei circuiti rivelatori quando siamo in presenza di alti dose rate. Questo effetto viene tipicamente visto come una caratteristica non lineare nella relazione tra dose rate e conteggio degli impulsi.

Eventi ionizzanti ripetuti, prossimi alla frequenza massima di conteggio, produrranno impulsi di ampiezza limitata. A causa di ciò, al crescere del conteggio

<sup>4</sup>Quantità di dose assorbita.

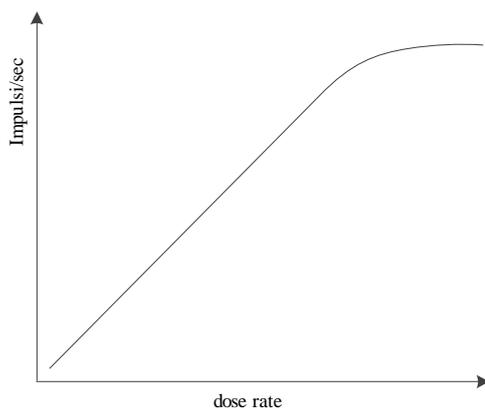


Figura 6: Numero di impulso vs dose rate

degli impulsi, il rivelatore impiega meno tempo in media per recuperare lo stato di carica da ogni evento, così che il tempo morto effettivo si riduce. La differenza tra il numero di impulsi reali e quelli osservati tende a diminuire. Chiaramente, per avere ottime prestazioni di conteggio, il circuito contatore deve avere una risoluzione temporale significativamente ridotta rispetto al tempo morto minimo del tubo GM.

#### 4.2 Riduzione del tempo morto

Il tempo morto può essere ridotto diminuendo il valore della resistenza serie sull'anodo. Questo, d'altro canto, potrebbe influire sulla ricombinazione degli ioni al catodo e quindi è necessaria una certa cautela. La soluzione migliore consiste nel collegare il resistore direttamente in prossimità del contatto d'anodo riducendo così la capacità parassita aggiunta. Questo migliora anche la robustezza fisica del tubo in condizioni di vibrazioni o shock fisici.

#### 4.3 Tempo di recupero

Subito dopo il tempo morto e, prima che il campo elettrico venga completamente ripristinato, all'interno del tubo è possibile soltanto una scarica limitata. Se trascorre del tempo aggiuntivo prima di una ulteriore scarica, la tensione ai capi del rivelatore cresce. L'evento ionizzante successivo, può generare una scarica sostanziale e quindi, un impulso di uscita maggiore. L'ampiezza di tali impulsi aumenterà fino a raggiungere il valore nominale massimo dopo il periodo completo di recupero. Il tempo di recupero è definito come il tempo minimo tra due impulsi di ampiezza nominale ed è circa il doppio del tempo morto.

### 5 Risposta alla radiazione

Il tubo GM è costruito in maniera tale da risultare sensibile alle particelle  $\alpha$ ,  $\beta$ , ai raggi  $x$  e  $\gamma$  e quindi, il responsabile della ionizzazione risulta esser legato a diversi fenomeni. Per le particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , la ionizzazione viene indotta dalle particelle che urtano con gli atomi del gas all'interno del tubo. Per i raggi  $x$  e  $\gamma$ , se le particelle sono a bassissimo contenuto energetico, il fenomeno è dovuto essenzialmente alla fotoionizzazione<sup>5</sup> degli atomi di gas. Per un qualunque significativo livello di questo tipo di radiazioni, la ionizzazione del gas viene innescata dagli elettroni iniettati dalla fotoemissione all'interno della superficie del catodo. L'efficienza della rivelazione varia in base al tipo di radiazione incidente. L'efficienza per tubi con finestre sottili raggiunge anche il 100% con particelle  $\beta$  ad alta energia.

<sup>5</sup>La fotoionizzazione è il processo fisico in cui un fotone, urtando un atomo, uno ione o una molecola, ne eietta uno o più elettroni.

D'altro canto, l'efficienza è bassa con particelle  $\beta$  a bassa energia e con particelle  $\alpha$  a causa dell'assorbimento del materiale che costituisce la finestra.

### 5.1 Particelle $\alpha$

Poiché hanno una massa elevata e viaggiano relativamente lente attraverso la materia, c'è un'alta probabilità che interagiscano con gli atomi del gas lungo il loro percorso. Queste particelle hanno perciò un alto potere ionizzante, perdono rapidamente energia ed hanno una scarsa capacità di penetrazione. L'energia di gran parte delle particelle  $\alpha$  è compresa tra 4MeV<sup>6</sup> e 6MeV. L'intervallo di tali particelle in aria è all'incirca compreso tra 25mm e 50mm. Questo implica che le particelle  $\alpha$  vengono rivelate con efficienza solo se la finestra del tubo GM non dista più di 10mm dalla sorgente. Per massimizzare la penetrazione delle particelle  $\alpha$ , la pressione della finestra in mica, deve essere ridotta a valori compresi tra 1,5 e 2,0  $mg/cm^2$ . La finestra necessita di una protezione agli urti meccanici assicurando, allo stesso tempo, che le particelle siano in grado di raggiungerla senza significativi impedimenti.

### 5.2 Particelle $\beta$

Con il termine radiazione  $\beta$  ci si riferisce agli elettroni che emergono dal decadimento nucleare<sup>7</sup> con energie che vanno

<sup>6</sup>L'elettronvolt viene definito come l'energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene mosso nel vuoto tra due punti di una regione in cui ha sede un potenziale elettrostatico, tra i quali vi è una differenza di 1 volt.

<sup>7</sup>La radioattività, o decadimento radioattivo, è un insieme di processi fisico-nucleari attraverso i quali alcuni nuclei atomici instabili o radioat-

ti (radionuclidi) decadono (trasmutano), in un certo tempo aleatorio detto tempo di decadimento, in nuclei di energia inferiore raggiungendo uno stato di maggiore stabilità con emissione di radiazioni ionizzanti.

da 0 al valore  $E_{MAX}$  che caratterizza ogni nucleone<sup>8</sup>. La maggior parte dei valori di  $E_{MAX}$  sono compresi nell'intervallo compreso tra 150keV e 2,5MeV, mentre l'energia media vale, approssimativamente,  $E_{MAX}/3$ . Le particelle  $\beta$  trattengono la loro energia più a lungo rispetto alle particelle  $\alpha$  e possono essere rivelate da tubi con finestra in mica. Le particelle  $\beta$  ad alta energia, possono essere rivelate con tubi aventi pareti in metallo sottile o vetro metallizzato.

### 5.3 Raggi $x$ a bassa energia

Radiazioni  $x$  a bassa energia, come quelli prodotti dai dispositivi cristallografici<sup>9</sup>, possono essere rivelati efficientemente mediante tubi con gas ad alta pressione. Il tubo GM viene orientato in maniera tale che la radiazione incidente attraverso la finestra, percorra tutta l'estensione del tubo. Con tubi che contengono gas ad alto coefficiente di assorbimento e per energie sotto i 25keV, c'è una significativa probabilità che la radiazione e il gas interagiscano e venga così generato un impulso di conteggio. Comunque, per la rivelazione di raggi  $x$  o raggi  $\gamma$  a basso contenuto energetico, vengono utilizzati altri gas ad alto numero atomico come lo xenon o il krypton.

<sup>8</sup>Per nucleone si intende una particella subatomica componente del nucleo atomico, cioè un protone o un neutrone. Il numero totale di nucleoni di un nucleo fornisce il numero di massa.

<sup>9</sup>La cristallografia è la scienza sperimentale che si occupa di determinare la disposizione degli atomi nei solidi.

#### 5.4 Raggi $\gamma$ e $x$ ad alta energia

Questi raggi con energia superiore ai 25keV hanno un'alta capacità di penetrazione. Essi possono essere rivelati tramite tubi GM quando la radiazione emette elettroni dalla superficie metallica interna del catodo. L'efficienza di conteggio per i raggi  $\gamma$  dipende dalla probabilità che una radiazione  $\gamma$  interagisca con le pareti del catodo e produca un elettrone  $e$ , dalla probabilità che lo stesso elettrone ionizzi il gas prima di arrivare alla fine del suo percorso. La probabilità di interazione al catodo generalmente aumenta al crescere del numero atomico del materiale che costituisce il tubo GM. L'efficienza del tubo è alta se il catodo è fatto di materiali ad alto numero atomico. Il materiale comunemente utilizzato è il ferro cromato (28%Cr), che ha il vantaggio di non reagire col gas ausiliario di ricombinazione (quencing gas). Può essere processato ed ottimizzato per l'inibizione della produzione di elettroni secondari. Nel progetto dei vecchi tubi GM, per aumentare l'efficienza di rivelazione, venivano utilizzati bismuto ( $z=83$ ) e piombo ( $z=82$ ). Nei tubi di ultima generazione, il catodo viene rivestito in platino ( $z=80$ ) che consente di ottenere un'ottima efficienza. Per i tubi convenzionali al ferro cromato, l'efficienza di rivelazione è circa pari all'1% su un largo intervallo di energia di radiazione  $\gamma$  e raggi  $x$ . Questo equivale solo all'1% dei fotoni incidenti che causano impulsi di conteggio. Nel campo della dosimetria da radiazione, comunque, la dose dei fotoni per unità di area, è fortemente dipendente dall'energia della radiazione. La maggior parte delle interazioni che producono impulsi, ha luogo nelle pareti del catodo. Per basse energie di radiazione ( $< 20keV$ ), le pareti di

un tubo al ferro cromato, attenuano considerevolmente la radiazione incidente e riducono, conseguentemente, la risposta del rivelatore.

## 6 Conclusioni

In questo articolo sono state discusse le caratteristiche dei tubi Geiger-Muller grazie ai quali è possibile rivelare la presenza di elementi radioattivi. E' stato fatto un breve cenno ai tipi di radiazioni rivelabili e sono stati messi in evidenza alcuni accorgimenti per il rilevamento degli impulsi generati durante la scarica dovuta all'attraversamento del tubo di particelle radioattive. Per concludere, la figura 7 mostra un tubo GM di produzione sovietica largamente utilizzato nella costruzione di contatori Geiger. Il tubo è un SBM-20 con gli elettrodi alle estremità, tensione di funzionamento intorno ai 450V e una zona di plateau che si estende per circa 100V.



Figura 7: Tubo GM SBM-20

## 7 Radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti sono quelle radiazioni dotate di sufficiente energia da poter ionizzare gli atomi (o le molecole) con i quali vengono a contatto. La caratteristica di una radiazione di poter ionizzare un atomo, o di penetrare più o meno in profondità all'interno della materia, dipende oltre che dalla sua energia anche dal tipo di radiazione e dal materiale con il quale avviene l'interazione. Da sempre l'uomo è soggetto all'azione di radiazioni ionizzanti naturali, alle quali si dà il nome di fondo di radioattività naturale. Questo parametro deve costituire il riferimento per eventuali valutazioni di rischio radioprotezionistico. Le radiazioni ionizzanti si dividono in due categorie principali: quelle che producono ioni in modo diretto (le particelle cariche  $\alpha$ ,  $\beta^-$  e  $\beta^+$ ) e quelle che producono ioni in modo indiretto (neutroni, raggi  $\gamma$  e raggi X). L'esposizione alle radiazioni ionizzanti può essere originata da:

- **Irradiazione Esterna (IE)** - sorgente di radiazioni esterna al soggetto;
- **Irradiazione Interna (II)** - sorgente di radiazioni interna al soggetto, introdotta per ingestione o inalazione.

Le radiazioni ionizzanti interagiscono con la materia attraverso il trasferimento di energia tramite processi di:

- Ionizzazione che consiste nella generazione di uno o più ioni a causa della rimozione o addizione di elettroni da una entità molecolare neutra (cioè atomi o molecole), che può essere causata da collisioni

tra particelle o per assorbimento di radiazioni;

- Eccitazione che avviene con una transizione di un sistema ad uno stato quantico di maggiore energia (stato eccitato). Durante l'eccitazione il sistema cattura una quantità discreta di energia dall'ambiente.

### 7.1 Grandezze di misura: IE

Per la radiazione esterna si utilizzano le seguenti grandezze di misura:

1. **dose assorbita (D)** in un mezzo: energia media assorbita per unità di massa del mezzo irradiato; unità di misura **Gray** (Gy, mGy,  $\mu$ Gy);
2. **dose equivalente (HT)** nel tessuto T: dose media assorbita nel tessuto T, pesata per tipo di radiazione R; unità di misura **Sievert** (Sv, mSv,  $\mu$ Sv);
3. **dose efficace (E)**: tiene conto della radiosensibilità relativa dei vari tessuti/organi; unità di misura **Sievert** (Sv, mSv,  $\mu$ Sv).

### 7.2 Grandezze di misura: II

Nel caso di irradiazione per introduzione nel corpo di radionuclidi, l'irradiazione si protrae fino a quando il radionuclide rimane nel corpo, ovvero fino a quando non viene totalmente eliminato per decadimento o per via biologica.

1. **dose efficace impegnata**: è la dose efficace prodotta per irradiazione interna integrata su 50 anni a partire dal momento dell'introduzione; unità di misura **Sievert** (Sv)

2. **attività**: numero di trasformazioni nucleari di un radionuclide<sup>10</sup> nell'unità di tempo; unità di misura: **Becquerel** (Bq).

### 7.3 Esposizione da fondo naturale

Il fondo di radioattività naturale è composto dalla radiazione terrestre (radiazione prodotta da nuclidi primordiali o da nuclidi cosmogenici in decadimento radioattivo) e dalla radiazione cosmica (extraterrestre). Componente fondamentale della radiazione terrestre è il Radon (Rn-222). È un gas naturale emanato dalla terra, radioattivo, inodore, insapore, invisibile e 7,5 volte più pesante dell'aria. Si diffonde ovunque e la sua concentrazione varia da luogo a luogo. Di seguito i livelli di irraggiamento e i rispettivi valori di assorbimento:

1. irraggiamento interno per inalazione di Radon e suoi derivati: dose media  $\sim 1,4\text{mSv/anno}$ ;
2. irraggiamento esterno dovuto a radiazioni cosmiche: dose media  $\sim 1,0\text{mSv/anno}$ ;
3. dose Efficace media della popolazione dovuta a fondo naturale:  $2,4\text{ mSv/anno} \sim 1,0\text{mSv(IE)} + 1,4\text{ mSv (II)}$ .

Limiti di esposizione della popolazione:

- 1 mSv/anno dose efficace;

<sup>10</sup>Un radionuclide è un nuclide instabile che decade emettendo energia sotto forma di radiazioni. Il nuclide indica collettivamente una singola specie nucleare, caratterizzata da un numero atomico  $Z$  e da un numero di massa  $A$ . Il numero di massa  $A$  è il numero totale di protoni e neutroni presenti nel nucleo. Il numero  $Z$  è il numero di protoni

- 15 mSv/anno dose equivalente al cristallino;
- 50 mSv/anno dose equivalente a pelle ed estremità.

Andiamo ora a vedere le grandezze che esprimono la quantità di radiazioni assorbite nei mezzi, nei tessuti e negli organi.

**Gray** (simbolo Gy): unità di misura della dose di energia assorbita da una unità di massa. Non è un diretto indicatore dei possibili danni alla salute, perché diversi tipi di radiazioni possono avere effetti più o meno dannosi per l'organismo (misurati in Sievert). Ha sostituito il rad (Radiation Absorbed Dose) nel Sistema Internazionale di unità di misura. Era un'unità di misura della dose di radiazione assorbita, pari a 100 erg per grammo. La scala indica le dosi di radiazioni ionizzanti che una persona può assorbire da diverse fonti. L'unità utilizzata è il Sievert (Sv) che misura gli effetti delle radiazioni sulle cellule del corpo umano. Poiché 1 Sv è una quantità grande in grado di far ammalare molto seriamente una persona e si riscontra raramente, si usano più frequentemente il milliSievert (un millesimo di Sievert, mSv) e il microSievert (un milionesimo di Sievert,  $\mu\text{Sv}$ ).

**Sievert** (simbolo Sv): dose di esposizione equivalente assorbita. È l'unità di misura degli effetti biologici e danni agli organismi viventi causati da radiazioni. Nella vita, normalmente siamo esposti a 2,4 milliSievert (mSv) all'anno. Il limite massimo di dose stabilito dalla legge italiana per le persone è 1 mSv per anno al di sopra della dose naturale di radiazioni; 20 mSv per lavoratori impe-

gnati in attività che prevedono l'uso o la manipolazione di radioisotopi.

Secondo il portavoce del governo giapponese Yukio Edano, a Fukushima sono stati registrati valori di trenta milliSievert al reattore n. 2, cento milliSievert al reattore n. 4 e 400 milliSievert al reattore n. 3.

Le tabelle che seguono riportano un confronto dei valori di radiazioni suddivisi in tre fasce. La scala indica le dosi di radiazioni ionizzanti che una persona può assorbire da diverse fonti. L'unità utilizzata è il Sievert (Sv) che misura gli effetti delle radiazioni sulle cellule del corpo umano. Poichè 1 Sv è una quantità grande in grado di far ammalare molto seriamente una persona e si riscontra raramente, si usano più frequentemente il milliSievert (un millesimo di Sievert, mSv) e il microSievert (un milionesimo di Sievert,  $\mu Sv$ ).

Tabella 3: Fascia radioattiva 3: allarme rosso

Valore	Descrizione
100 mSv	dose più piccola chiaramente collegata a un aumento del rischio-cancro
250 mSv	dose massima consentita per i lavoratori che operano per salvare delle vite
400 mSv	dose singola capace di causare avvelenamento da radiazioni
2 Sv	avvelenamento grave da radiazioni, anche fatale
8 Sv	dose fatale anche con le terapie
50 Sv	dose ricevuta stando 10 minuti vicino al reattore di Chernobyl dopo l'esplosione

Tabella 1: Fascia radioattiva 1

<b>Valore</b>	<b>Descrizione</b>
$0,05\mu Sv$	dormire un anno con qualcuno: il corpo umano emette una piccolissima dose di radiazioni anche a riposo
$0,09\mu Sv$	vivere un anno entro 80 Km da una centrale nucleare
$0,1\mu Sv$	mangiare una banana, ricca di potassio
$0,3\mu Sv$	vivere un anno entro 80 Km da una centrale a carbone
$1\mu Sv$	stima della dose assunta in media da un italiano per la nube proveniente dal Giappone
$3,5\mu Sv$	extra dose assunta in media al giorno nella zona di Fukushima, da aggiungere alla radiazione naturale, per un tempo indefinito e certamente molto lungo
$5\mu Sv$	radiografia ai denti o a una mano
$10\mu Sv$	radiazione di base assunta da un abitante della Terra in media in un giorno. La radiazione naturale varia moltissimo da zona a zona
$20\mu Sv$	radiografia al torace
$40\mu Sv$	volare da New York a Los Angeles
$80\mu Sv$	dose assunta in seguito all'incidente di Three Mile Island da una persona che viveva entro 10 miglia dalla centrale
$250\mu Sv$	limite massimo di rilascio annuo di una centrale nucleare imposto dall'Environmental Protection Agency americana
$390\mu Sv$	dose derivata in un anno dalle fonti naturali di potassio

Tabella 2: Fascia radioattiva 2: preoccupante

<b>Valore</b>	<b>Descrizione</b>
1 mSv	limite di sicurezza annuo stabilito dalla legge italiana, quantità che va ad aggiungersi alla dose naturale di radiazioni
1 mSv	dose assunta in media da un italiano per il passaggio della nube di Chernobyl
1 mSv	dose massima rilevata all'esterno della centrale di Three Mile Island dopo l'incidente
1 mSv	radiografia convenzionale
2,4-3mSv	dose media annua assunta da un italiano per l'esposizione alla radioattività naturale
3 mSv	fare una mammografia
3,6 mSv	dose giornaliera rilevata a 50 chilometri dalla centrale di Fukushima il 27 marzo
4 mSv	fare una Tac total body
6 mSv	dose assunta stando un'ora nel sito di Chernobyl nel 2010
6,9 mSv	dose oraria massima registrata a 75 km dall'impianto di Fukushima il 27 marzo
10-20 mSv	fare una scintigrafia
20-50 mSv	massima dose annua consentita per i lavoratori che operano con fonti ionizzanti in Italia e negli Usa

## Riferimenti bibliografici

- [1] l'Espresso, '*Gruppo Editoriale L'Espresso Spa*', 1999-2010.
- [2] Centronic, '*Geiger Muller tubes*', Centronic, Iss. 1.
- [3] Knoll, Glenn F., '*Radiation Detection and Measurement: Third Edition*', Hoboken: John Wiley & Sons, 2000.
- [4] INFN, '*Radiazioni ionizzanti*'.