

## ***Introduzione alle Radiazioni Ionizzanti***

### **1.Introduzione**

Accade abbastanza di frequente sentire parlare di *radiazioni* alla TV o di leggere sul giornale notizie relative agli effetti delle radiazioni ionizzanti. In questa nota si introducono le nozioni essenziali per capire in maggior dettaglio le caratteristiche, l'uso e i metodi per la misura dell'intensita' della radiazione.

Innanzitutto, per non fare troppa confusione, si dira' che l'argomento ha poco a che vedere con le cosiddette *radiazioni non ionizzanti*. Quest'ultime sono altrettanto popolari e specie negli ultimi anni se ne e' discusso molto. Per inquadrare meglio le cose diremo che le radiazioni vengono divise in ionizzanti e non. Le *radiazioni non ionizzanti*, a cui per completezza si vuole fare un breve cenno, sono causate da campi elettrici e magnetici dovuti a:

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

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

Rivolgiamo quindi l'attenzione alle *radiazioni ionizzanti*.

Si comincera', nel capitolo 2, a descrivere e a catalogare le radiazioni ionizzanti. Nel capitolo 3 si introducono e analizzano le sorgenti di radiazioni ionizzanti. Successivamente, nel capitolo 4, si definiscono le grandezze che si usano per misurarne l'attivita'. Finalmente, nel capitolo 5, si descrivera' una strumentazione adatta per la misura dell'intensita' concludendo con una misura dell'attivita' ambientale, che sara' descritta nel capitolo 6.

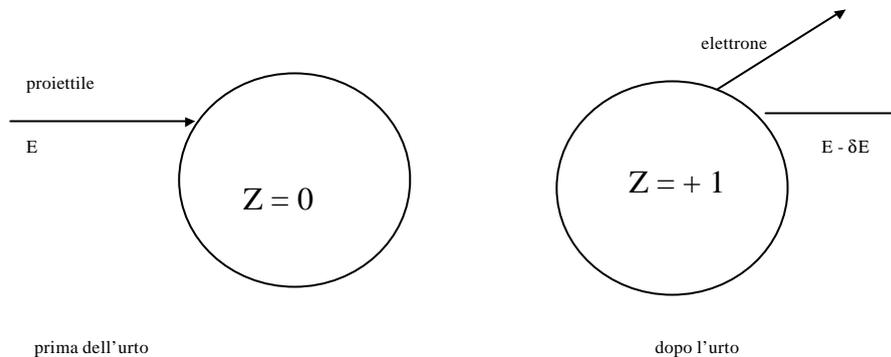
Approfondimenti sono introdotti (in *corsivo*) per completare alcuni argomenti. Infine al termine di ciascun capitolo si trova un breve riassunto con le relazioni fondamentali.

### **2.Proprieta' delle radiazioni ionizzanti**

Con la denominazione *radiazioni ionizzanti* si identifica il passaggio nella materia di particelle (corpuscoli) o fotoni con conseguente ionizzazione della stessa. Il processo di ionizzazione e' dovuto alla cessione di energia da parte della radiazione alla materia mentre la attraversa. La particella-proiettile con energia  $E$  urta uno degli elettroni atomici e gli cede una parte dell'energia,  $\delta E$ , strappandolo dall'atomo (vedere la schematizzazione in Figura 1). La particella incidente riemerge con energia  $E - \delta E$ , mentre l'elettrone atomico acquisisce energia pari circa a  $\delta E$ .

A partire dall'atomo complessivamente neutro si vengono ad avere quindi due particelle cariche ( a prescindere dalla particella-proiettile che rapidamente si allontanera'): l'elettrone con carica  $-1$ , e lo ione con carica  $+1$ .

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



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

Si può allora intuire come le radiazioni ionizzanti possano essere pericolose alle cellule di esseri viventi: infatti se l'energia ceduta da una particella mentre attraversa una cellula rompe il legame molecolare di una delle catene del DNA, la cellula può morire oppure autonomamente ripararsi. In questa operazione può anche accadere che il codice genetico venga re-interpretato in modo sbagliato innescando un processo pericoloso. Entrambi i processi, morte della cellula e auto-riparazione, avvengono continuamente nella materia vivente e la probabilità di una mutazione è estremamente piccola.

Seguono due approfondimenti: il primo affronta in modo più dettagliato i meccanismi con cui i vari tipi di proiettile interagiscono con la materia.

Un secondo approfondimento tratta i processi radiobiologici innescati dalla ionizzazione della materia cellulare.

## Approfondimento

### *Passaggio di particelle attraverso la materia*

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

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

<sup>1</sup>  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ . Lo eV è una conveniente unità di misura dell'energia e corrisponde all'energia acquistata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt.

*Inoltre la perdita di energia e' linearmente proporzionale alla densita' della materia attraversata.*

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

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

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

### **Danno biologico della radiazione.**

*In questo approfondimento si esaminano i meccanismi per cui la radiazione ionizzante puo' danneggiare le cellule.*

*I principali processi di danno cellulare sono di due tipi:*

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

*Esaminiamo brevemente i due casi.*

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

*A parità di dose (vedere la definizione nei prossimi capitoli), la radiazione dovuta a fotoni e elettroni presenta tipicamente una minore aggressività e pericolosità.*

*La ionizzazione di una molecola di  $H_2O$  dà luogo a uno ione positivo  $H_2O^+$  e  $e^-$ . In tempi molto brevi si ha che lo ione  $H_2O^+$  si separa in  $H^+ + OH$ , mentre invece lo  $e^-$  si attacca ad una molecola di  $H_2O$  dando luogo a  $H + OH$ . Le molecole di  $OH$  (dette radicali) si muovono abbastanza liberamente e possono attaccare il DNA.*

*In entrambi i casi, danno diretto dovuto a rottura di legami molecolari o indirettamente attraverso la produzione di radicali liberi, il DNA può auto-ripararsi, e in questo caso non ci saranno effetti, oppure può riportare un danno di tipo permanente. Questa seconda possibilità è molto poco probabile per cui la tipica radioattività naturale introduce un fattore di rischio praticamente nullo.*

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

### 3. Sorgenti di radiazioni ionizzanti

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

#### Radioattività naturale

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

- Con il termine *raggi cosmici* si intendono particelle cariche di alta energia che arrivano dallo spazio. All'ingresso dell'atmosfera i raggi cosmici sono costituiti per lo più da protoni (86%) e da nuclei di elio (13%). A livello del mare i raggi cosmici sono principalmente costituiti da muoni,  $\mu$ . Hanno uno spettro energetico che, sempre a livello del mare, è centrato attorno a 2 GeV e possono arrivare fino a  $10^{20}$  eV. Il numero approssimativo di raggi cosmici che arrivano al suolo è di circa 1 particella/( $cm^2 \times min$ ). Quindi una persona, che possiamo stimare abbia una sezione quando visto dall'alto di (20x60)  $cm^2$  sarà attraversata da ~1200 particelle/minuto<sup>2</sup>.

- I decadimenti spontanei di elementi radioattivi che si trovano comunemente in natura costituiscono una preponderante frazione della radioattività naturale a cui si è soggetti. L'elemento più comune è il radon, che è un gas che si trova anche nel cemento. Questo fa sì che nelle case normalmente ci sia un livello di radioattività naturale più alta che all'aperto. Inoltre i valori cambiano molto da regione a regione della Terra e anche spostandoci di pochi chilometri si possono misurare variazioni notevoli. Si vedranno in seguito i livelli di radioattività ambientale nelle diverse zone terrestri.

Ricordiamo che storicamente le radiazioni da decadimenti di elementi radioattivi erano note come  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$ .

---

<sup>2</sup> Questo è un conto del tutto approssimato e in verità per difetto. Soltanto se i raggi cosmici fossero accuratamente verticali il numero trovato sarebbe corretto. In effetti i raggi cosmici arrivano da tutte le direzioni anche se sono preponderanti le direzioni verticali.

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

## Radioattività artificiale

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

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

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

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

## 4. Unità di misura dosimetriche

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

È ancora in uso, come unità di misura, il **rad**:  $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$ .

### Approfondimento

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

diventa piu' facile se si divide l'intero volume in sottovolumi e si fa tendere a valori molto piccoli il volume considerato.

Un altro problema puo' nascere dal fatto che se il volume (piccolo) considerato e' circondato da parti non omogenee (densita' che cambia molto) la misura dell'energia risulta disturbata.

In ultima analisi si ha interesse a misurare la dose nel corpo umano, per questo motivo le misure si fanno in fantoccio di acqua o plexiglass. Il fantoccio e' semplicemente un oggetto di dimensioni simili a quelle del corpo umano. Il fantoccio d'acqua e' una vasca piena d'acqua, mentre il fantoccio di plexiglass e' costituito da lastre di plexiglass con dei fori entro i quali si pongono i rivelatori.

Per quel che riguarda il rivelatore, che non e' normalmente fatto di acqua e/o plexiglass, costituisce una disomogeneita'. Per effettuare misure di precisione, il rivelatore deve essere un oggetto molto piccolo per non disturbare troppo la deposizione di energia. Per dirla in modo piu' tecnico la dose in un punto del volume del fantoccio,  $D(x,y,z)$ , e' data da  $dE / dm$  ove con  $dE$  e  $dm$  si intendono rispettivamente la quantita' di energia,  $dE$ , depositata in un volume il piu' piccolo possibile di massa  $dm$ . Infine il materiale del rivelatore deve essere il piu' possibile simile al corpo umano. La grandezza rilevante e' il rapporto  $Z_{eff} / A_{eff}$  dove con  $Z_{eff}$  e  $A_{eff}$  si indicano rispettivamente il numero atomico efficace e il numero di massa efficace. Nel caso dell'acqua stanno nel rapporto 10 / 18, essendo  $A_{eff}$  dell'acqua pari a  $16 \times 1 + 1 \times 2 = 18$  e  $Z_{eff} = 8 \times 1 + 1 \times 2 = 10$ . I valori efficaci di una molecola si calcolano sommando il numero di massa o atomico, rispettivamente, su tutti gli atomi che costituiscono la molecola.

Un'altra grandezza di rilievo e' la dose equivalente o efficace (detta anche RBE da Relative Biological Effectiveness). Questa rappresenta la dose misurata non in termini di pure grandezze fisiche ( energia e massa) ma in termini di efficacia' biologica.

La dose efficace,  $D_e$ , e' legata alla dose  $D$  da un fattore detto fattore di qualita',  $Q$ , che dipende dal tipo di radiazione ( fotoni, elettroni, protoni, neutroni, alfa, etc...) e dall'energia della particella incidente,  $D_e = Q \times D$ . La seguente tabella da i valori di  $Q$  per varie particelle.

L'unita' di misura della dose equivalente e' il **Sievert (Sv)** =  $Q \times \text{Gray}$ .

E' ancora usato, come unita' di misura, il **rem** : 100 rem = 1 Sv.

|                     | fotoni | elettroni | protoni | $\alpha$ | neutroni |
|---------------------|--------|-----------|---------|----------|----------|
| Fattore di qualita' | 1      | 1         | 10      | 20       | 3        |

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

L'unita' di misura e' il mSievert/anno

### Sorgenti naturali

|                                                                   |              |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|
| Raggi cosmici                                                     | 0.3 mSv/anno |
| Radioattivita' naturale dovuta all'ambiente                       | 0.3 mSv/anno |
| Sorgenti presenti nel corpo ( $^{40}\text{K}$ , $^{12}\text{C}$ ) | 0.3 mSv/anno |
|                                                                   | -----        |
| Totale                                                            | 1 mSv/anno   |

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

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

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

Come si può rilevare le differenze fra città e città sono piuttosto notevoli. Si è però ben al di sotto delle soglie di rischio.

### *Radioattività artificiale*

Esame raggi-X  
TAC

1 mSv  
10 mSv

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

**Sommario.** La grandezza con cui si misura la radiazione è la **dose** che è definita come l'energia rilasciata,  $\Delta E$ , divisa per la massa  $\Delta m$ , ove la massa da considerare è quella in cui l'energia è stata depositata. L'unità di misura è il Gray (Gy):  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$ . La dose equivalente, la cui unità è il Sievert (Sv), misura la efficacia biologica della dose fisica, cioè il danno biologico. Si ottiene moltiplicando la dose fisica per un coefficiente di qualità dipendente dal tipo di particella-proiettile.

Le sorgenti di radioattività si suddividono in naturali e artificiali.

La radioattività naturale a sua volta è dovuta a raggi cosmici, attività ambientale, e elementi radioattivi presenti nel corpo. Ciascuna causa contribuisce per circa un terzo del totale, che si somma a circa 1 mSv/anno.

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

## 5. Misura della dose

La misura della dose e' fatta con strumenti che misurano l'energia depositata,  $\Delta E$ , nella massa,  $\Delta m$ .

Per poter eseguire una stima della possibile pericolosita' del fenomeno occorre anche valutare il rateo di dose, cioe' la dose per unita' di tempo. Occorre quindi eseguire la misura rilevando il tempo trascorso,  $\Delta T$ , per la deposizione della dose  $D$ .

Proviamo ad analizzare le grandezze da misurare e gli strumenti necessari.

La rilevazione di  $\Delta T$  non presenta particolari problemi in quanto la misura dura mediamente diversi minuti o addirittura ore, per cui un normale cronometro e' sufficiente per determinare l'intervallo temporale con precisione di qualche per cento.

Anche la misura della massa puo' essere fatta in modo accurato senza troppe difficolta': conoscendo la densita',  $\rho$ , del rivelatore (vedere nei prossimi paragrafi che cosa si intenda per rivelatore) e misurandone il volume,  $\Delta V$ , si puo' calcolare la massa  $\Delta m$ . Anche per  $\Delta m$  la precisione che si puo' ottenere e' facilmente a livello di qualche per cento.

La grandezza  $\Delta E$  presenta invece maggiori difficolta' ed e' su questa che concentreremo l'attenzione: durante l'intervallo di tempo  $\Delta T$  si deve rivelare ciascuna particella che deposita energia nella massa in esame e, per ciascuna di esse, misurare l'energia rilasciata.. Quindi  $\Delta E = \sum E_i$ , cioe'  $\Delta E$  e' la somma di tutte le deposizioni di energia  $E_i$ .

La strumentazione per la misura appena discussa e' oggetto dei prossimi paragrafi.

Cominciamo con dividere l'apparato nei vari componenti: rivelatore, trasduttore, analizzatore del segnale e programma per la presentazione grafica dei dati.

Cercando di spezzare il problema della comprensione dei singoli componenti in parti elementari si potranno capire gran parte degli strumenti.

### Rivelatori

Non si presenteranno tutti i rivelatori possibili ma soltanto due (rappresentativi) che vengono usati frequentemente per la misura della dose: a) Geiger; b) scintillatore di NaI (Ioduro di Sodio).

#### a) Rivelatore Geiger

Il rivelatore e' costituito dall'aria compressa fra due elettrodi a cui si applica una differenza di potenziale. Quindi si puo' immaginare come una celletta dalle dimensioni di qualche centimetro cubo contenente aria. Le pareti della celletta sono fatte da materiale isolante, per esempio plastica.

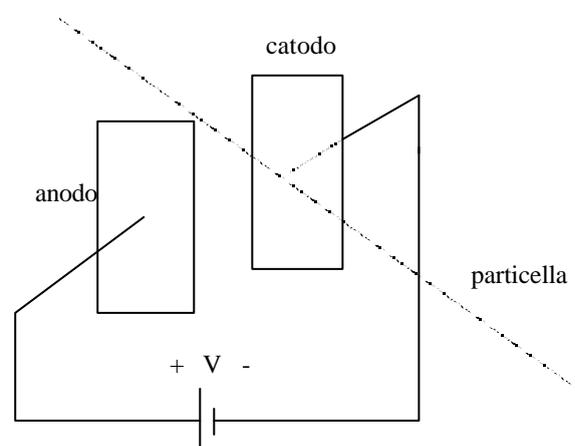


Figura 2. Schema di principio di una celletta

Su due pareti opposte sono state inserite due placchette metalliche che funzionano come elettrodi. Infine gli elettrodi sono collegati ad un generatore di tensione continua: un elettrodo al polo positivo (anodo) e l'altro al polo negativo (catodo). Le particelle che passano fra i due elettrodi ionizzano l'aria e generano un segnale elettrico. Lo schema presentato e' di fatto uno schema di principio e fra qualche pagina si giungera' a descrivere una configurazione piu' funzionale. Con in mente lo schema descritto e rappresentato in figura 2 cominciamo ad esaminarne il funzionamento.

Bisogna partire da un po' distante: il meccanismo piu' probabile con il quale si ha la deposizione di energia di una particella carica che attraversa un mezzo avviene mediante la ionizzazione degli atomi del mezzo stesso. Di questo si era discusso nel capitolo 2 e con maggior dettaglio in uno degli approfondimenti. Comunque per capire il rivelatore Geiger dobbiamo di nuovo introdurlo e ampliarlo: il proiettile nel passare nel mezzo urta contro gli atomi. Il volume occupato da un atomo e' dominato dagli elettroni atomici. In altri termini si puo' visualizzare l'atomo come un nucleo costituito da A nucleoni circondato da una nuvola di elettroni. Ciascun nucleone si puo' immaginare come una sfera dal raggio,  $r_0$ , di circa 1 fm (1 fm (fermi) =  $10^{-13}$  cm) quindi il volume nucleare corrispondera' a circa  $A (4/3 \pi r_0^3)$ . In prima approssimazione si puo' assumere che il raggio nucleare,  $R_N$ , valga  $r_0 (A)^{1/3}$ . Essendo  $r_0$  circa uguale a 1 fm, si ha che il raggio nucleare vale qualche fermi. Per esempio per un atomo di Ossigeno ( $A = 16$ ) si ha  $R_N \sim 2.5$  fm. Invece il raggio atomico, cioe' il raggio entro il quale stanno gli elettroni atomici, e' di qualche  $\text{\AA}$  (1  $\text{\AA}$  (Amstrong) =  $10^{-10}$  m), quindi centinaia di migliaia di volte piu' grande del raggio nucleare. Tutto questo ragionamento per dire che risulta molto piu' probabile che il proiettile incontri uno degli elettroni atomici piuttosto che il nucleo. Facciamo ancora un'altro passo: il proiettile nell'urtare un elettrone cede a questo una parte della sua energia. Normalmente l'energia ceduta e' tale da rompere il legame fra nucleo e elettrone inducendo un processo di ionizzazione dell'atomo. Quindi come risultato del frenamento del proiettile nel mezzo si producono delle coppie elettrone - {atomo a cui manca un elettrone, quindi con una carica positiva} che vengono dette coppie elettrone-ione. Se si immergono le coppie in un campo elettrico<sup>3</sup> si otterra' che gli elettroni vanno da una parte (verso l'anodo<sup>4</sup>) e gli ioni dall'altra (verso il catodo). Quindi, proseguendo con questo ragionamento qualitativo ma sostanzialmente accurato, si avra' che un fiotto di cariche arriveranno sul polo positivo. Lo stesso numero di cariche arriveranno sul polo negativo ma spaziate all'interno di un intervallo molto piu' lungo poiche' gli ioni, che sono molto piu' massivi rispetto agli elettroni, viaggiano piu' lentamente. In prima approssimazione il rapporto fra le velocita' di ioni e elettroni dipende al rapporto fra le masse. Aggiungiamo ancora che la velocita' degli elettroni, che essendo quelli che arrivano prima sono anche i piu' interessanti, dipende dal campo elettrico oltre che dal tipo di gas. Indicativamente, per valori del campo elettrico pari a circa 1 kV/cm, la velocita' vale a 50  $\mu\text{m/ns}$  (ns = nanosecondo =  $10^{-9}$  secondi).

Ritorniamo invece al meccanismo di raccolta degli elettroni: il passaggio della particella carica ha scatenato la ionizzazione del mezzo attorno alla retta ideale tracciata dalla particella. Gli elettroni sono indotti a migrare per effetto della differenza di potenziale e arriveranno ben presto<sup>5</sup> all'anodo. Questo fenomeno costituito da particelle cariche (elettroni) che arrivano su un conduttore durante un limitato intervallo di tempo e' comunemente chiamata corrente.

Ricapitolando: se una particella carica attraversa un mezzo si liberano elettroni. Se il mezzo e' opportunamente immerso in un campo elettrico, allora gli elettroni si manifestano sul conduttore come un *impulso di corrente*. Letto al contrario si puo' affermare che un impulso di corrente *tradisce* il passaggio di una particella nel mezzo. Quindi se si attacca al conduttore uno

<sup>3</sup> Per ottenere un campo elettrico e' sufficiente predisporre due superfici piane e metalliche alle quali si applica una differenza di potenziale.

<sup>4</sup> Anodo corrisponde al polo positivo mentre il catodo e' connesso al polo negativo della batteria

<sup>5</sup> Se per esempio la distanza fra i due elettrodi e' di 1 cm si avra' che il tempo che impiegano tutti gli elettroni ad arrivare (anche quelli piu' distanti) e' di  $1\text{cm}/50\mu\text{m/ns} = 200$  ns.

strumento che conti quante volte e' arrivato un impulso di corrente abbiamo risolto il problema di rilevare e quindi contare quante particelle sono passate nel mezzo.

Facile. Vediamo come invece per questioni piu' tecniche ci siano delle difficolta'. Diciamo subito che le difficolta' sono dovute al fatto che gli impulsi di corrente sono molto piccoli e che e' estremamente difficile costruire dei conta-impulsi che siano sensibili a questi piccoli segnali. Occorrono un po' di numeri e occorre prenderli come buoni in quanto non sono facilmente intuibili. Prima pero' diciamo che il mezzo che consideriamo e' un gas (aria per esempio), che presenta un'alta resistivita'<sup>6</sup>.

1. l'energia media per creare una coppia elettrone-ione e' di circa 35 eV;
2. l'energia media persa da una particella carica e con velocita' elevata<sup>7</sup> in un mezzo gassoso e' di circa 1.5 keV/cm.

E' immediato derivare quante coppie vengono create:  $1.5 \text{ (keV/cm)} / 35 \text{ eV} = 43 \text{ coppie/cm}$

La corrente generata sull'elettrodo e' data da : (numero di coppie) x (carica di ciascuna coppia)/(intervallo temporale). Ci sono tutti gli ingredienti e e' quindi sufficiente sostituire i numeri per calcolare il valore della corrente media dell'impulso:  $43 \text{ coppie} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb} / 200 \times 10^{-9} \text{ s} = 3.44 \times 10^{-11} \text{ A}$ . Corrente estremamente piccola e quasi impossibile da rilevare.

Occorre trovare una soluzione. L'idea alla base della *soluzione* prevede che il mezzo possa anche fare da *amplificatore*. Questo equivale a dire che il mezzo puo' moltiplicare il segnale associato a ciascun processo di ionizzazione.

Vediamo allora di fotografare la situazione dal punto di vista dell'elettrone che e' appena stato liberato dall'atomo di appartenenza. E' libero da vincoli e l'unica forza che sente e' quella del campo elettrico che e' stato applicato dall'esterno. Facciamo l'ipotesi piu' semplice: il campo elettrico, E, e' caratterizzato da linee di forza parallele fra di loro e, per semplificare ulteriormente il problema, e' costante nell'intorno dello spazio in cui l'elettrone si trova. La forza, F, che agisce sull'elettrone e' data da:  $F = q \times E$ , ove q e' il valore della carica elettrica ed E e' il valore (bisognerebbe dire modulo) del campo elettrico. Nel caso in cui gli elettrodi (anodo e catodo) siano due conduttori metallici a facce piane parallele poste a distanza d, allora  $E = V/d$ , ove V e' la differenza di potenziale che e' applicata. 'q' e' data dal valore della carica unitaria,  $1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$ .

Rimane da definire la direzione della forza che in questo caso risulta essere particolarmente facile in quanto l'elettrone e' attirato dall'elettrodo positivo. Quindi immaginiamo la situazione in modo pittorale: gli elettroni liberati dal passaggio del proiettile si muoveranno verso l'anodo (ma tutto questo lo sapevamo gia') tutti soggetti ad una forza costante pari a  $q \times V/d$ . Sappiamo pero' che ciascun elettrone soggetto a forza costante acquistera' un'energia pari a  $F \times s = qVs/d$ , ove s e' lo spostamento dell'elettrone. Infatti essendo la forza parallela allo spostamento basta moltiplicare i due termini per ottenere l'energia. Prima di procedere oltre, proviamo a calcolare l'energia acquistata da un elettrone in un gas in funzione del campo elettrico. Assumeremo che il gas sia a temperatura ambiente e pressione atmosferica di  $1 \text{ kg/cm}^2$ . Usiamo per questo delle unita' coerenti che ci portino a calcolare E in termini di eV. L'unita' di misura eV e' stata citata piu' volte ed e' ora di provare a fare un facile conto. Poniamo che le facce piane parallele siano distanti 1 cm e sia stata applicata una differenza di potenziale di 1000 Volt. Il mezzo e' semplicemente aria. Un elettrone liberato dall'atomo parente percorre uno spazio s pari a 1 mm. L'energia acquistata sara' data da :  $(1 e) (1000 \text{ V}) (1 \text{ mm}) / (10 \text{ mm}) = 100 \text{ eV}$ .

Il valore del percorso dell'elettrone di 1 mm e' completamente arbitrario quando confrontato con la realta'. Cerchiamo quindi, con semplici ragionamenti, di fare delle stime piu' ragionevoli sul cammino fatto liberamente dall'elettrone. Ovviamente se il mezzo fosse costituito da un solo atomo, l'elettrone una volta liberato se ne andrebbe attraverso il vuoto fino a finire sull'anodo.

---

<sup>6</sup> Ricordiamo che il mezzo riempie lo spazio fra i due elettrodi e che se fosse conduttivo si avrebbe una corrente fra anodo e catodo che dipenderebbe dalla resistenza del mezzo e quindi le misure sarebbero molto difficili.

<sup>7</sup> Si intende come *velocita' elevata* una velocita' v che sia confrontabile con quella della luce c. Per esempio  $\beta = v/c$  maggiore di 0.7 puo' essere considerata una velocita' elevata.

Se invece ci sono *molte* atomi, e' intuitivo pensare che l'elettrone sia accelerato finche' non va a sbattere su un'altro atomo. Dopodiche' tutta la situazione e' da riesaminare. Infatti molto probabilmente urtera' contro un elettrone di un altro atomo e a questo cederà parte dell'energia che aveva acquisito per effetto del campo elettrico. Addirittura se la cessione e' abbastanza generosa puo' succedere che l'elettrone dell'atomo bersaglio sia liberato, creando quindi una situazione ancora diversa. Ritorniamo al problema originario, che e' quello di stimare il cammino che l'elettrone puo' percorrere liberamente prima di urtare un atomo bersaglio. La risposta intuitiva e':

- dipende dal numero di atomi del mezzo per unita' di volume (densita' atomica);
- dalla dimensione di un atomo.

Cominciamo col calcolare il numero di atomi per unita' di volume (densita' atomica). Si sa che nei gas e' molto inferiore rispetto a liquidi e/o solidi. Inoltre, nei gas, la densita' atomica dipende dalla pressione e temperatura. Ricordate la legge dei gas:  $pV = nRT$  ove  $n$  e' il numero di moli, che e' proporzionale al numero di atomi attraverso il numero di Avogadro. Per inciso, per variare  $p$  a parita' di  $T$  (temperatura) e  $V$  (volume) occorre cambiare  $n$ .

Anche se non strettamente necessario (ma forse e' istruttivo) valutiamo la distanza media fra gli atomi in un gas. La chiave per stimare la distanza media fra gli atomi sta nel calcolare quanti atomi ci sono per unita' di volume a temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ) e a pressione pari a  $1\text{ kg/cm}^2$ . Per fare questo conto si possono usare diverse strade e una particolarmente semplice (e non troppo sbagliata) e' la seguente. Si sa che un grammo atomo di una qualsiasi sostanza contiene  $N_{Av}$  ( $6.022 \times 10^{23}$  atomi/grammo atomo), se assumiamo che l'aria sia principalmente Azoto (il fatto che ci sia circa un 20% di Ossigeno non introduce un apprezzabile errore poiche' il peso atomico dello Azoto ( $A=14$ ) non e' molto diverso da quello dell'Ossigeno ( $A=16$ )), allora 14 grammi di Aria (Azoto) contengono  $N_{Av}$  atomi di Azoto. Consideriamo un cubetto di lato pari a  $1\text{ cm}$  ( $1\text{ cm}^3$ ) contenente aria, la sua massa vale  $\rho \times V$ , ove  $\rho$  e' la densita' dell'aria e  $V$  e' il volume. Dalle tabelle si puo' evincere che  $\rho$  vale  $1.2 \times 10^{-3}$  grammi/ $\text{cm}^3$  a pressione di  $1\text{ kg/cm}^2$  e temperatura di  $20^\circ\text{C}$  e da qui si ricava che la massa di  $1\text{ cm}^3$  di aria vale  $1.2 \times 10^{-3}$  grammi. Si e' pronti a valutare quanti atomi di Azoto ci sono nel cubetto di  $1\text{ cm}^3$ :  $N_{at} = N_{Av} \times \rho \times V / A = 6.022 \times 10^{23} \times 1.2 \times 10^{-3} \text{ gr} / 14 \text{ gr} = 5.16 \times 10^{19}$  atomi/ $\text{cm}^3$ .

Come esercizio valutiamo la distanza media fra gli atomi. Svolgiamo il calcolo in mm: ogni atomo ha a disposizione un volumetto pari  $1000\text{ mm}^3 / 5.16 \times 10^{19} = 1.94 \times 10^{-17}\text{ mm}^3$ . Il lato di questo volumetto si ottiene immediatamente estraendo la radice cubica di  $1.94 \times 10^{-17}\text{ mm}^3$ , che vale  $2.7 \times 10^{-6}\text{ mm}$ . Le dimensioni atomiche sono circa di  $1\text{ \AA}$  equivalente a  $0.1 \times 10^{-6}\text{ mm}$ .

Quindi deduciamo che la distanza media fra gli atomi nel gas e' pari a circa 30 volte le dimensioni atomiche.

Esaminiamo ora il secondo elemento che contribuisce alla determinazione del libero cammino medio: le dimensioni atomiche. Fra le righe e' gia' stato scritto: le dimensioni atomiche sono circa di  $1\text{ \AA}$ , ove per dimensioni atomiche si intende il raggio del volume atomico,  $r_A$ .

Questo significa che guardando l'atomo da distante esso appare come un disco la cui area e' pari a  $\pi (r_A)^2 \sim 3.14 (0.1 \times 10^{-6})^2\text{ mm}^2$ .

Si puo' ora determinare quale sia il libero cammino medio di un elettrone libero in gas (Aria o come si e' assunto Azoto). Se si moltiplica il numero di atomi per unita' di volume,  $n_V = N_{Av} \times \rho / A$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]<sup>8</sup>, per l'area del disco atomico<sup>9</sup>,  $\pi (r_A)^2$  [ $\text{cm}^2$ ], si ottiene una grandezza che dimensionalmente vale [ $\text{cm}^{-1}$ ]. Cosa rappresenta il prodotto  $n_V \pi (r_A)^2$ ? Se lo si moltiplica per una lunghezza,  $l$ , otteniamo dimensionalmente un numero che rappresenta il numero medio di atomi che incontrerebbe un elettrone percorrendo la distanza  $l$ . Pare davvero ragionevole infatti: se raddoppiamo la distanza percorsa  $l$ , ci si aspetta che il numero di atomi incontrati raddoppi;

<sup>8</sup> Per ricavare la relazione si e' considerato una precedente relazione in cui si calcolava il numero di atomi contenuti nel cubetto di  $1\text{ cm}^3$ ,  $N_{at}$ , e diviso per  $V$ .

<sup>9</sup> In effetti l'elettrone libero vede l'atomo come un disco.

simile sorte si ha se si raddoppia il numero di atomi per unita' di volume. Invece se il raggio raddoppia, per esempio, l'area occupata dall'atomo quadruplica: il numero di atomi incontrati incrementera' dello stesso fattore.

Il cammino libero medio,  $\lambda$ , viene definito come la lunghezza l necessaria per far si' che il numero di atomi incontrati sia in media 1 (uno)<sup>10</sup>. Quindi  $\lambda = 1 / n_V \pi (r_A)^2$ , con i numeri usati in questo esempio:  $\lambda = 1 / 5.16 \times 10^{19} \times \pi \times (0.1 \times 10^{-6})^2 = 6.2 \times 10^{-4}$  mm.

*Tutta questa pagina per determinare il percorso medio di un elettrone fra un urto e l'altro con gli atomi del mezzo.* Non perdiamo pero' di vista lo scopo del calcolo che consisteva nel determinare (sempre qualitativamente) l'energia che l'elettrone puo' acquistare quando, accelerato dal campo elettrico, si sta muovendo fra un urto e il successivo.

L'energia vale  $q \times V \times \lambda / d = 1000 \text{ eV} \times 6.2 \times 10^{-4} \text{ mm} / 10 \text{ mm}$  (facendo uso dei numeri dell'esempio precedente) = 0.062 eV. Troppo poco affinche' possa ionizzare un secondo atomo e moltiplicare quindi la carica primariamente generata.

Una possibilita' potrebbe essere quella di aumentare V per raggiungere un'energia di qualche eV (sufficienti per ionizzare un atomo), ma occorrerebbe arrivare a piu' di 16000 V per iniettare un'energia di 1 eV all'elettrone. Per maneggiare differenze di potenziale cosi' elevate su distanze di 1 cm con aria (Azoto) come dielettrico occorrono precauzioni non banali. Quindi la strada non e' percorribile. La soluzione e' invece quella di aumentare E (campo elettrico) senza eccedere con V (differenza di potenziale che si applica). Questo puo' essere fatto in modo semplice sostituendo la configurazione a elettrodi piani con facce parallele con una soluzione fatta da un filo (di diametro a, per esempio di 50  $\mu\text{m}$ ), che costituisce l'anodo, infilato al centro di un cilindro (di diametro b, per esempio di 1 cm). Andando a ripassare Elettrostatica si scoprira' (o meglio si ritrovera') che il campo elettrico in questo caso e' dato da:  $E(r) = (V / \ln(b/a)) / r$ . A differenza del caso con conduttori a facce piane parallele, dove il campo elettrico era quasi costante dentro il volumetto compreso fra gli elettrodi, qui E dipende da r, ove con r indichiamo la distanza dal centro del sistema, cioe' dall'asse centrale del filo che e' anche l'asse del cilindro. In effetti, il filo e il tubo attorno sono coassiali e r e' la distanza dal centro. Quindi, quando r e' piccolo, E e' grande e viceversa.

Valutiamo quanto e' grande E appena fuori dal filo (anodo) per esempio a  $r = 30 \mu\text{m}$  (a 25  $\mu\text{m}$  si e' proprio sulla superficie del filo). Utilizziamo ancora una differenza di potenziale V pari a 1000 Volt (questo e' un buon valore che quando applicato su scale del centimetro in aria non fora il dielettrico, e non si prende la scossa).  $\ln(b/a)$  sta per *logaritmo naturale* o in base e. Dalle tabelle (o calcolatrice) si trova:  $\ln(10 \text{ mm} / 50 \mu\text{m}) = \ln(200) = 5.3$ . Quindi  $E = (1000/5.3) / 30 \mu\text{m} = 63000 \text{ V/cm}$  (non male!). Quindi quando l'elettrone giunge nei pressi dell'anodo trova un campo elettrico molto elevato. Conseguenze: 1) viene accelerato fino a raggiungere energie di almeno qualche eV; 2) ha energia sufficiente per ionizzare un altro atomo e quindi raddoppiare la carica primaria (quella che ha liberato originariamente il proiettile); 3) lo stesso processo, adattando V, a e b, puo' ripetersi piu' volte prima che l'elettrone raggiunga l'anodo e quindi si puo' ottenere una moltiplicazione anche di  $10^{10}$  volte.

Siamo ormai al termine, e si e' arrivati alla chiave di volta per moltiplicare la carica e di conseguenza la corrente che si puo' raccogliere al passaggio di una particella carica nell'aria: occorre costruire una celletta anodo-catodo a struttura cilindrica. In verita' anche un filo in mezzo ad una cella quadrata potrebbe fare al nostro caso, ma e' piu' facile servirsi di un tubicino (metallico) in cui si infila un filo (metallico) teso con un centinaio di grammi per farlo stare sempre al centro<sup>11</sup>. Tutte le volte che una particella carica attraversa la celletta una carica

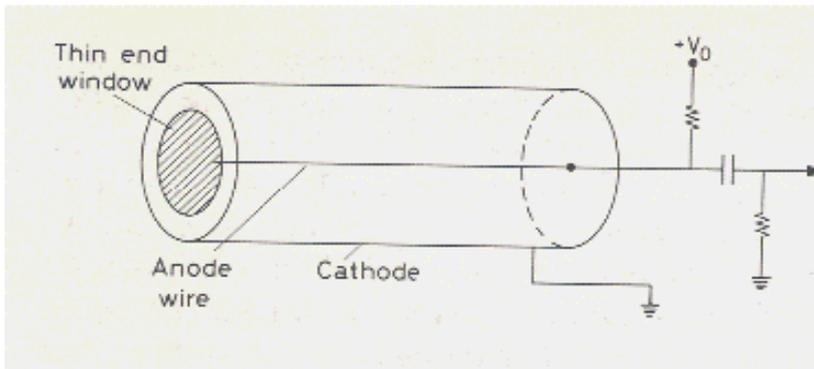
---

<sup>10</sup> Per una precisa definizione si dovrebbero introdurre dei coefficienti (non troppo diversi da uno) che possiamo, per questi scopi, ignorare.

<sup>11</sup> In effetti anche se il filo non e' perfettamente al centro poco succede se non che il campo elettrico sposta il filo perfettamente al centro.

piuttosto consistente di elettroni (per effetto della moltiplicazione) si sposta verso l'anodo generando una corrente.

In figura 3 si fa vedere lo schizzo di una celletta cilindrica.



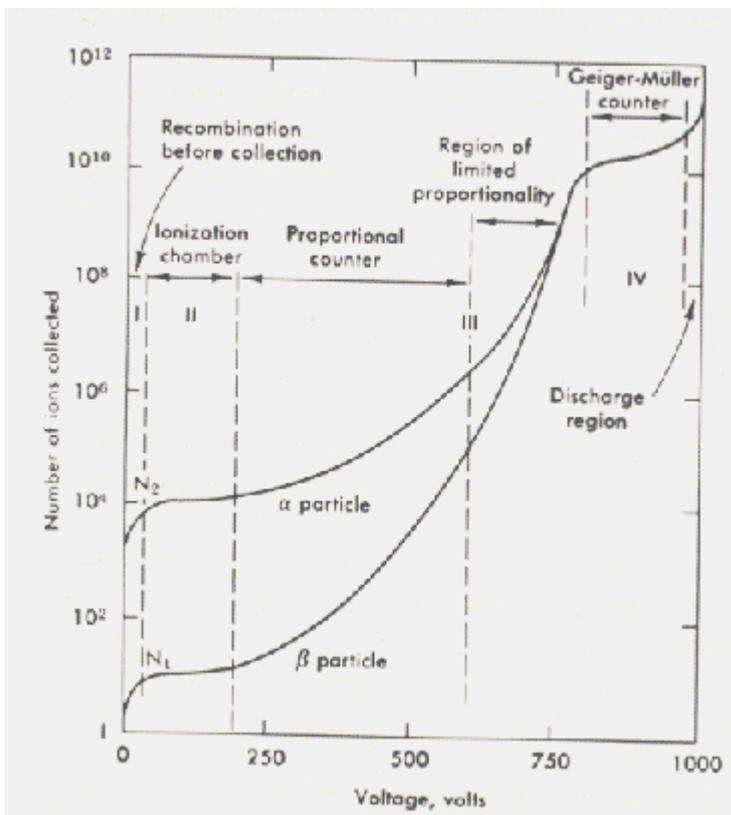
**Figura 3.** Schizzo di una celletta cilindrica: l'anodo e' il filo centrale posto a tensione  $+V_0$ , il catodo (cilindro esterno) e' posto a massa (0 Volt).

Se il filo anodico e' connesso ad un *amplificatore* seguito da un *contatore di impulsi* si possono contare quante particelle passano nella celletta in un dato intervallo di tempo,  $N_{\Delta t}$ .

Si puo' calcolare l'energia depositata per unita' di tempo,  $\Delta E$ , posto che si assuma il valor medio di energia rilasciata,  $\langle E \rangle$ , per ciascuna particella che attraversa la celletta:  $\Delta E = \langle E \rangle \times N_{\Delta t}$ .

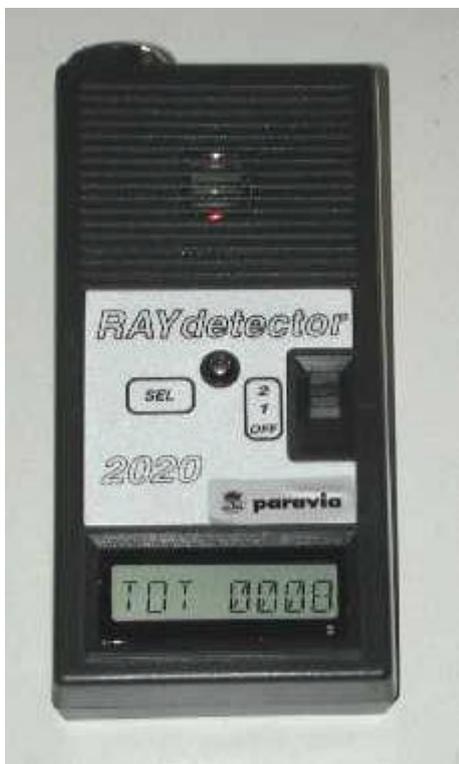
Finalmente si puo' calcolare la dose,  $D$ , rilasciata, sempre nel suddetto intervallo di tempo:  $D = \Delta E / \Delta m$ , ove  $\Delta m = \rho \times V$  cioe' densita' volte volume della celletta per la determinazione della massa.

Completiamo questo approfondimento riprendendo un grafico che rappresenta il guadagno di un gas in funzione della tensione applicata.



**Figura 4.** In questo grafico si rappresenta il guadagno di un gas in funzione della

tensione applicata. Per tensioni molto basse (regione I) e' dominante il processo di ricombinazione: non tutti gli ioni generati vengono raccolti dagli elettrodi ma si ricombinano. Con tensioni piu' alte (regione II) il guadagno diventa unitario cioe' tutti le cariche sono raccolte. Aumentando ancora la tensione ( regione III) il guadagno comincia ad aumentare fino ad arrivare a valori molto elevati. Nella regione IV il guadagno e' cosi' elevato che si formano delle scariche (regime Geiger).



**Figura 5.** Fotografia del contatore Geiger portatile. Sulla parte bassa sono situati i tasti di controllo. All'estremita' superiore e' situato il contatore.

In figura 5 e' rappresentata la fotografia di un misuratore di dose basato su un contatore Geiger. Sia il contatore, l'alimentatore di alta tensione, l'amplificatore di segnale, il contatore di impulsi e il traslatore da impulsi a dose e' conglobato nel misuratore.

### b) Rivelatore a scintillatore organico o inorganico

Passiamo ad esaminare una categoria di rivelatori che ha una complessita' ma anche delle prestazioni maggiori. Anticipiamo che questi rivelatori permettono oltre che il conteggio delle particelle che passano ( e talune volte si fermano) nel rivelatore anche la misura dell'energia depositata da ciascuna particella. Fanno parte di una categoria piu' ampia detta *a scintillazione* che sono certamente fra i piu' usati e che hanno costituito la base per innumerevoli rivelatori che hanno permesso importanti scoperte.

1. Gli scintillatori organici sono costituiti da idrocarburi ( catene C-H). Il meccanismo, spiegato in modo approssimativo, e' il seguente: ci sono elettroni ( detti di valenza) che sono debolmente legati alle catene molecolari. E' quindi come se non appartenessero ad un atomo specifico ma fossero piuttosto un 'patrimonio' comune a piu' molecole. Quando uno di questi e' urtato dal proiettile acquista abbastanza energia per liberarsi (in effetti ha bisogno di poca energia per farlo) e passare a quella che viene chiamata *banda di conduzione*. Si muovera' liberamente da una molecola all'altra (attenzione in questo caso non e' applicato un campo elettrico e quindi questi elettroni liberi si muovono confusamente senza una precisa direzione) e dopo un po' di girovagare sono destinati a essere catturati da una delle molecole. Questo processo avviene con l'emissione di una

debole energia sotto forma di fotone che ha lunghezza d'onda di ~410 nm corrispondente al blu. Quindi la perdita di energia di una particella che attraversa lo scintillatore si traduce in una emissione di luce blu. Ovviamente lo scintillatore deve essere trasparente.

2. Gli scintillatori inorganici sono invece cristalli alcali a cui si sono aggiunti delle impurità attivatrici. Il più comune fra questi è lo Ioduro di Sodio (NaI) a cui si aggiunge Tallio (Tl) come attivatore. Uno degli elettroni dell'attivatore, quando l'attivatore è immerso nel cristallo, è debolmente legato e può facilmente essere liberato da una particella che attraversa il cristallo. Ritorna a legarsi ad uno degli atomi emettendo luce blu.

Per applicazioni generiche i due tipi di scintillatori sono molto simili, soltanto per applicazioni specialistiche si differenziano per due aspetti:

1. la quantità di luce per la medesima energia depositata è maggiore per lo NaI(Tl) per un fattore 4 circa rispetto agli organici;
2. il tempo caratteristico durante il quale l'emissione di luce avviene: pochi nanosecondi ( $10^{-9}$  s) per gli organici contro centinaia di nanosecondi per gli inorganici.

Si ha quindi a disposizione un rivelatore che 'traduce' l'energia depositata in radiazione luminosa.

Per la misura che si descrive in questa nota si usa uno scintillatore inorganico di NaI che è mostrato in figura 6. Si presenta come un cilindro rivestito in alluminio. Soltanto una delle basi del cilindro è fatta di vetro per permettere il passaggio della luce.

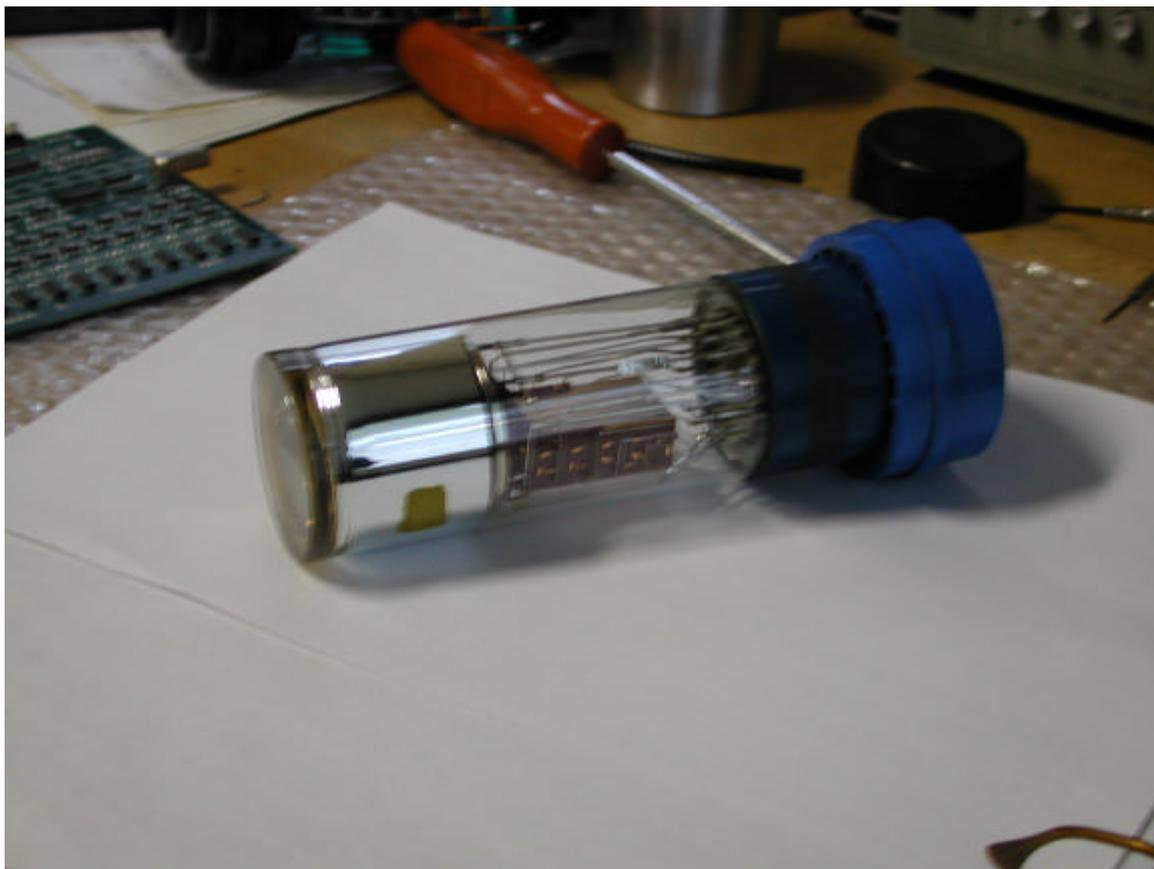


**Figura 6.** Esempio di rivelatore di NaI: l'involucro è completamente di alluminio, eccetto che per una delle due basi che è costituita da una finestra di vetro. L'involucro deve essere a tenuta in quanto lo NaI è igroscopico e in presenza di umidità perderebbe la trasparenza.

Occorre fare un successivo passaggio poiche' sappiamo che le grandezze fisiche facili da maneggiare sono correnti/tensioni. La luce invece non e' facilmente rilevabile in modo diretto<sup>12</sup>. D'altro canto per rilevare ( in senso lato) correnti e tensioni si ha a disposizione un vasto armamentario fornito dall'elettronica. La traduzione luce (fotoni) a corrente (elettroni) e' fatta mediante oggetti detti fototubi.

Un esempio di fototubo e' mostrato in figura 7 e il funzionamento viene descritto nelle prossime pagine.

Sono fatti da un finestra da dove entra la luce generata nel rivelatore. Quindi la luce passera' dal rivelatore, dove e' stata generata dal passaggio della particella, al fototubo attraverso le due finestre poste a contatto ottico. Attaccato alla finestra sul lato interno del fototubo (spalmato addirittura poiche' si presenta come una vernice) vi e' uno strato di materiale fotosensibile<sup>13</sup>. Il processo che avviene puo' essere compreso intuitivamente: il fotone arriva sul materiale fotosensibile e penetra finche' non urta con uno degli elettroni atomici e gli cede parte della sua energia. Qui bisogna immaginare il fotone come se fosse un corpuscolo che va ad urtare l'elettrone. Se l'elettrone non e' troppo legato alla struttura costituita dal materiale e se acquisisce, grazie all'urto, energia sufficiente puo' sfuggire al materiale stesso. Questa evenienza avviene circa nel 20% dei casi per i cosiddetti materiali fotosensibili ( che hanno una struttura tale per cui alcuni elettroni atomici non sono troppo legati alla struttura stessa). Cioe' se arrivano 5 fotoni con energia corrispondente al blu, in media un elettrone sfuggira' al materiale fotosensibile.



**Figura 7.** Esempio di fototubo: la finestra sulla sinistra (fotocatodo) viene posta a contatto con la finestra di vetro del rivelatore. Sono visibili alcuni dinodi (color rame).

---

<sup>12</sup> Si potrebbe guardare con attenzione il rivelatore nel buio piu' assoluto e contare le volte che si vede un fiotto di luce. Ma questo modo di procedere e' troppo impegnativo e poi funzionerebbe soltanto per basse frequenze di conteggio.

<sup>13</sup> Sono miscele di Antimonio (Sb), Cesio (Cs), Potassio (K), e Sodio (Na).

Si e' fatto un enorme passo avanti: partiti dalla luce generata dal proiettile siamo arrivati ad avere a disposizione elettroni liberi. Ma il fototubo non finisce con la finestra e il materiale fotosensibile ( insieme dei due e' detto *fotocatodo*), continua invece con una sequenza (una decina) di *dinodi* che servono per moltiplicare il numero di elettroni emessi dal fotocatodo.

Questi sono degli elettrodi disposti a circa 1 cm uno dall'altro e posti a tensione crescente ciascuno rispetto al precedente. Il partitore di tensione si presenta come in figura 8. Il fototubo termina con dei connettori (parte destra di figura 7), che vengono inseriti in un apposito zoccolo del partitore (parte in basso della foto).

Anche i dinodi sono spalmati con materiale a basso lavoro di estrazione ( significa e' sufficiente poca energia per estrarre gli elettroni dal materiale). Vediamo cosa succede ad un elettrone primario estratto dalla luce che ha colpito il fotocatodo: la differenza di potenziale fra fotocatodo e primo dinodo lo accelera verso il primo dinodo. Urta con gli elettroni atomici del primo dinodo cedendo la sua energia ad alcuni di loro. Questi in molti casi acquistano abbastanza energia per poter sfuggire dal dinodo. A questo punto vengono accelerati dal secondo dinodo che si trova ad un potenziale piu' alto e il processo si ripete. Si ha quindi un fenomeno di moltiplicazione per cui dai pochi elettroni usciti dal fotocatodo, dopo che si e' passati attraverso una decina di dinodi, si arriva ad avere un numero di elettroni un fattore  $10^6 - 10^7$  piu' grande. Il processo raccontato si svolge molto rapidamente, questione di pochi nanosecondi. Questa caratteristica permette di conoscere il tempo in cui e' avvenuto il passaggio della particella nel rivelatore con buona precisione.

Quindi, ricapitolando, con un rivelatore a scintillazione si puo' determinare oltre al numero di particelle che passano e/o si fermano, anche l'energia depositata da ogni singolo evento in quanto c'e' una relazione fra quantita' di luce emessa dal processo originario e quantita' di elettroni che arrivano all'anodo.



**Figura 8.** Partitore di tensione: distribuisce la tensione ai dinodi.

A questo punto si può calcolare la dose rilasciata nel rivelatore con buona precisione, infatti per determinare la massa si procede come nell'esempio del contatore Geiger calcolando il volume del cilindro e moltiplicarlo per la densità dello NaI. Invece per calcolare l'energia depositata totale occorre sommare l'energia rilasciata da ciascun processo, quindi:  $\Delta E = \sum E_i$  ove con  $E_i$  si indica l'energia rilasciata dallo  $i$ -esimo evento.

Quindi per calcolare la dose si deve sommare l'energia rilasciata ove la somma si estende su tutte le particelle-proiettile che sono passate attraverso o si sono fermate nel rivelatore in un determinato intervallo di tempo. Una volta calcolata l'energia totale depositata la si deve dividere per la massa del rivelatore e la dose è finalmente calcolata.

Paragonando i due sistemi di misura, Geiger e rivelatore a scintillatore, si può osservare che il Geiger fornisce una misura approssimata, poiché non ci si preoccupa di conoscere *evento per evento* quale sia l'energia depositata, ma si assume un valor medio e si contano quanti processi sono avvenuti nell'intervallo di tempo prescelto.

Invece per il rivelatore a scintillazione la misura è più precisa ma occorre un sistema di misura molto più complesso. L'approccio e la descrizione del sistema saranno oggetto dei prossimi paragrafi. Rileviamo ancora la seguente importante differenza fra i due rivelatori: poniamo di misurare la radioattività per esempio in una cava di montagna dove, per ipotesi è presente, nella roccia, una sorgente radioattiva e diffusa, per esempio di  $Cs^{137}$ . Il  $Cs^{137}$  è diventato famoso dopo l'incidente di Chernobyl, ed è *riconoscibile* poiché decade emettendo un  $\gamma$  di energia pari a 634 keV.

Dato che con il Geiger si contano soltanto i processi indipendentemente dall'energia di ciascun processo, non ci sarà modo di accorgerci che nella roccia è presente in maniera anomala il  $Cs^{137}$ . Diversa è la situazione con il rivelatore a scintillazione. La somma della carica che arriva sull'anodo è proporzionale alla energia rilasciata nel rivelatore e quindi in ultima analisi all'energia del fotone o della particella che si è fermata o all'energia depositata nel caso in cui la particella attraversi il rivelatore senza fermarsi.

**Sommario.** Ricapitoliamo passo per passo (questa parte è un riassunto dei paragrafi precedenti):

- l'energia depositata è *tradotta* in luce blu dal rivelatore in modo assolutamente proporzionale: più si deposita energia più luce viene emessa.
- la luce che arriva al fotocatodo del fototubo viene convertita in elettroni primari. Anche questo processo non può che essere proporzionale.
- gli elettroni emessi dal fotocatodo sono moltiplicati dal fototubo. Il coefficiente di moltiplicazione dipende soltanto dalla tensione che si applica al fototubo (dell'ordine di 2000 Volt). Se si mantiene costante la tensione di alimentazione del fototubo allora anche il coefficiente di moltiplicazione è costante.

Quindi il passaggio da energia depositata dalla particella al numero di elettroni che arrivano all'anodo si può spezzare nei tre suddetti passi che sono tutti individualmente costanti (purché si tengano le condizioni esterne costanti). Quindi la carica,  $Q_A$ , che arriva sull'anodo si può esprimere come  $G \times E_i$ , ove  $G$  è una costante che si può misurare in Coulomb/eV, e  $E_i$  è l'energia depositata.

Cosa significa e cosa permette di fare questa proporzionalità? Se si è in presenza di una sorgente radioattiva come  $Cs^{137}$ , che come detto sopra emette fotoni di energia ben definita (634 keV), avverrà che la carica raccolta dall'anodo corrisponderà ad un ben preciso valore. Poniamo che valga 50 pC (1 pC =  $10^{-12}$  C), accadrà che durante la *presa dati* la lettura della carica a cui corrisponde 50 pC sarà frequente. Quanto frequente dipenderà dall'attività della sorgente  $Cs^{137}$  diffusa nella roccia. Si riprenderà questo tipo di ragionamento.

## Forma dei segnali

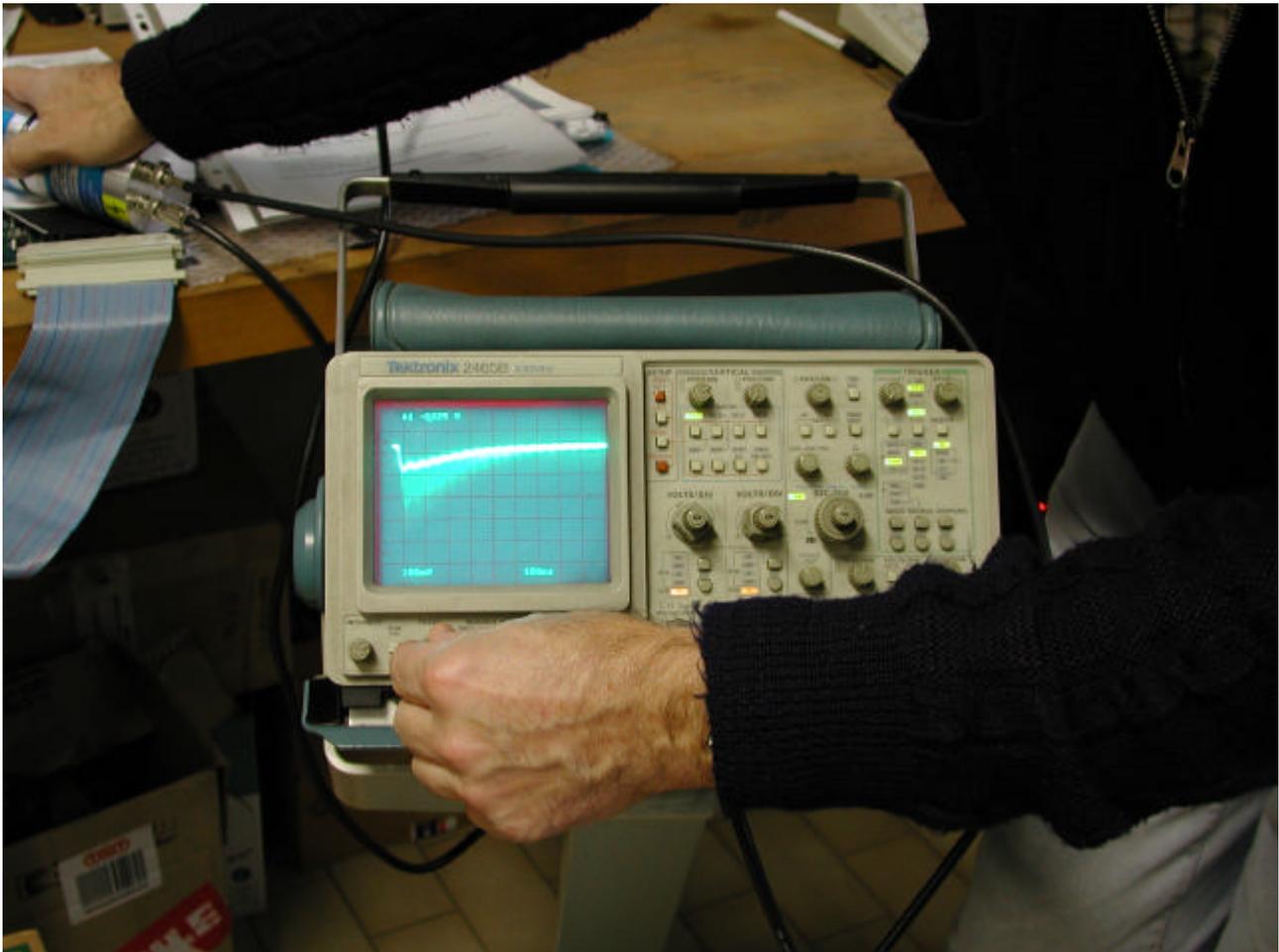
I prossimi paragrafi possono sembrare ostici essendo tecnici, ma lo scopo è quello di comprendere la strumentazione a grandi linee e a blocchi. Anche se i dettagli sono complicati, a grandi linee dovrebbero essere comprensibili i componenti del sistema.

Cominciamo con l'esaminare la forma dei segnali elettrici all'uscita del fototubo.

Notiamo che anche nel caso del contatore Geiger si hanno segnali simili a quelli che andiamo a vedere.

Lo strumento principe per analizzare i segnali elettrici è l'oscilloscopio.

La figura 9 riporta una fotografia dei segnali all'uscita di un fototubo e visti all'oscilloscopio.



**Figura 9.** Segnali in uscita da un rivelatore NaI visti all'oscilloscopio.

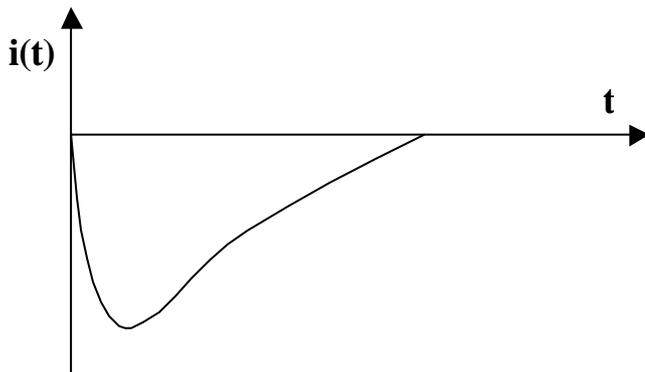
Si può interpretare la figura come un grafico (x-y): sull'asse orizzontale si ha come variabile il tempo con unità di 100 nsec per quadretto e sull'asse verticale la variazione di tensione dell'anodo. I grafici che vediamo nella figura sono una successione di segnali che vengono sovrapposti uno sull'altro facendoli partire tutti dallo stesso punto temporale. È un po' come se vedessimo i segnali dovuti a un centinaio di particelle che sono passate nell'arco temporale di qualche decimo di secondo dopo che sono stati tutti rigorosamente allineati. La ragione per cui l'oscilloscopio (analogico occorre aggiungere) lavora in questo modo esula un po' dallo scopo di questa nota. Si possono però aggiungere alcuni commenti che per lo meno aiutano a capire meglio quanto si sta vedendo all'oscilloscopio. Quello che si vede è il risultato del moto composto di un pennello di elettroni che attraversa lo schermo comandato da: lungo l'asse x

(orizzontale) dal tempo e quindi si muove con moto costante; lungo l'asse y (verticale) dal valore della tensione anodica e si muove quindi in modo irregolare. Risultato: si rappresenta il grafico di  $Y = f(X)$  che corrisponde a  $V = f(T)$ . Inoltre, invece di fare un unico grafico, si ha che i grafici di piu' segnali sono sovrapposti a partire tutti dallo stesso punto temporale. Sono sovrapposti soltanto perche' c'e' una persistenza del segnale sullo schermo e quindi se segnali arrivano ravvicinati temporalmente ( dentro un intervallo di poche decine di msec) appaiono sovrapposti<sup>14</sup>.

## Determinazione della carica associata al passaggio di una particella

L'oscilloscopio e' la strumentazione base per visualizzare i segnali in uscita dell'anodo del fototubo, pero' non permette di misurare la carica elettrica associata al passaggio di una particella. In effetti questa affermazione non e' del tutto vera: ci sono oscilloscopi digitali che permettono di misurare la carica associata ad un segnale. Immaginate pero' la fatica: ogni volta che passa una particella occorre leggere sul display il valore della carica, scriverla su un foglietto per poi farne la somma. Senza contare che in generale passano centinaia di particelle al secondo: impossibile da farsi. C'e' bisogno di una strumentazione piu' specialistica, non necessariamente piu' costosa. In questo capitolo si cerchera' di capire qualitativamente di cosa ci sia bisogno, usando per quanto e' possibile idee semplici.

Una singola particella che passa nel rivelatore genera una traccia sul quadrante dell'oscilloscopio che appare come la curva raffigurata nello schizzo in figura 10.



**Figura 10.** Schizzo che rappresenta l'andamento di un segnale all'uscita di un fototubo connesso ad un rivelatore NaI: la corrente e' mostrata in funzione del tempo.

Il grafico e' simile a quanto si vede sull'oscilloscopio: in questo schizzo si rappresenta la corrente  $i(t)$  in funzione del tempo  $t$ . In effetti sull'oscilloscopio si visualizza una tensione  $v(t)$  in funzione del tempo. Se pero' si considera l'ingresso dell'oscilloscopio si notera' che c'e' una resistenza di 50 Ohm. Ricordando la legge di Ohm :  $v = R \times i$ , cioe' la tensione ai capi di una resistenza  $R$  non e' nient'altro che la corrente  $i$  moltiplicata per  $R$  stessa, si puo' intuire che parlare di corrente o tensione ( soltanto in questo caso specifico e ricordando quanto si e' appena detto) non fa alcuna differenza concettuale. Nell'oscilloscopio la corrente che entra incontra immediatamente una resistenza  $R$  ( per inciso di 50 Ohm) che traduce la corrente in tensione.

Sono ancora necessari un paio di commenti:

- il segnale e' negativo *quasi* per convenzione e non ci deve turbare;

<sup>14</sup> Un oscilloscopio digitale permette invece di acquisire e visualizzare un singolo segnale. L'uso dell'oscilloscopio analogico piuttosto che digitale dipende soltanto dal tipo di applicazione.

- la forma del segnale dipende dal rivelatore, dal fototubo e anche dalla lunghezza del cavo che deve percorrere il segnale per arrivare all'oscilloscopio. Ma tipicamente si può dividere il segnale in diversi settori temporali: all'inizio la luce emessa al passare della particella cresce molto rapidamente e questo settore corrisponde alla prima parte del grafico, dove la corrente cresce rapidamente in valore assoluto. Quindi la luce emessa decresce come un esponenziale e la corrente ovviamente la segue. La costante di tempo dell'esponenziale per un rivelatore di NaI è di circa 250 ns. Questo ci fa dire che dopo ~750 nsec (tre costanti di tempo) il segnale si è, con buona approssimazione esaurito.

## Integratore + ADC

La carica totale,  $Q_A$ , si ottiene integrando nel tempo la curva  $i(t)$ :  $Q_A = \int i(t) dt$ . Ribadendo quanto affermato prima si avrà' altresì che  $Q_A = 1/R \int v(t) dt$ , quindi a parte una costante,  $R$ , parlare di corrente o tensione risulta essere la stessa cosa.

L'operazione di integrazione non viene fatta analiticamente ma mediante un circuito elettronico.

Ci sono in effetti due componenti separati:

- a) il circuito che integra di fatto la corrente e in uscita fornisce una tensione proporzionale alla carica: viene detto integratore ed è costruito da un amplificatore operazionale<sup>15</sup> opportunamente configurato;
- b) un circuito che converte il valore della tensione (proporzionale alla carica) in un numero digitale. Questo componente è detto ADC (Analog to Digital Converter).

Alla carica  $Q_A$  è fatto corrispondere in uscita allo ADC un numero: tipico coefficiente di conversione è 0.256 pC / conteggio ADC. Quindi se in uscita all'ADC si legge 100 immediatamente si ha che la carica vale: 0.256 pC/conteggio x 100 conteggi = 25.6 pC.

Consideriamo l'integratore + convertitore ADC come un unico blocco che dato un segnale in ingresso fornisce in uscita un numero proporzionale alla carica  $Q_A$ . Per pilotarlo, in ingresso occorre fornire il segnale da integrare. Oltre a questo segnale, occorre inviare un segnale che definisca i limiti dell'integrale, cioè il momento  $t_1$  a cui iniziare l'integrazione e il momento  $t_2$  a cui terminare l'integrazione. Possiamo immaginare che l'intervallo di integrazione  $t_2 - t_1$  debba abbracciare tutto il segnale e cioè deve valere ~750 ns o poco più'. (Ricordiamo che la lunghezza del segnale, per rivelatori di NaI, vale circa 750 ns).

## Sincronizzatore

Si è definito, nella precedente sezione, e descritto la parte di strumentazione che permette di integrare il segnale che arriva dall'anodo. È ora tempo di accennare al modo con cui si fa la sincronizzazione dell'intervallo di integrazione con il segnale stesso, cioè la questione è la seguente: come si fa a inviare il segnale che definisce  $t_1$  in modo che fra  $t_1$  e  $t_2$  vada a cadere il segnale da integrare? La definizione di  $t_2$  non risulta essere un problema poiché arriva con 750 ns di ritardo rispetto a  $t_1$ . Quindi il problema da risolvere sta proprio nel generare il segnale  $t_1$  in modo che sia sincrono con il segnale. I componenti elettronici che compongono la sincronizzazione insieme con l'integratore e lo ADC sono implementati su una scheda che è inserita nel Personal Computer (PC) oppure è connessa alla porta seriale del PC. La scheda è mostrata in figura 11 ed è l'ultima verso il basso. La scheda genera anche la tensione per

---

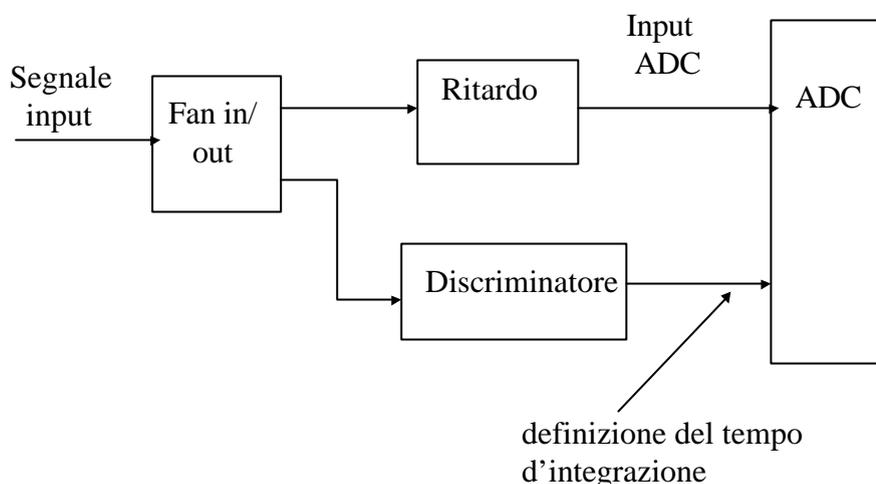
<sup>15</sup> Gli amplificatori operazionali sono dei componenti integrati molto comuni nell'elettronica. Con semplici connessioni si possono ottenere blocchi che effettuano operazioni algebriche o anche più complesse, come integrale e/o derivata, sui segnali elettrici.

alimentare il fototubo. Due cavi escono dalla scheda: uno per portare la tensione al fototubo e un secondo cavo che porta il segnale dal fototubo all'integratore. I risultati della conversione sono trasmessi dalla scheda al PC attraverso il bus. Infine un programma preconfezionato permette la visualizzazione dei dati e l'analisi degli stessi. In un'altra configurazione tutta l'elettronica contenuta sulla scheda e' compressa e posta su un canotto alla base del fototubo. I dati vengono trasmessi al PC attraverso la connessione seriale. Questa configurazione e' molto vantaggiosa poiche' non richiede di installare una scheda all'interno del PC e la connessione e' fatta esternamente.



**Figura 11.** *La scheda che contiene l'elettronica per effettuare la integrazione, la sincronizzazione e la conversione del segnale e' quella sulla sinistra in basso.*

Lo schema a blocchi e' fatto vedere in figura 12. Ogni blocco rappresenta un insieme di componenti che appartengono logicamente ad uno steso oggetto. Le linee con freccia indicano le direzioni dei segnali.



**Figura 12.** Schema di principio del sincronizzatore

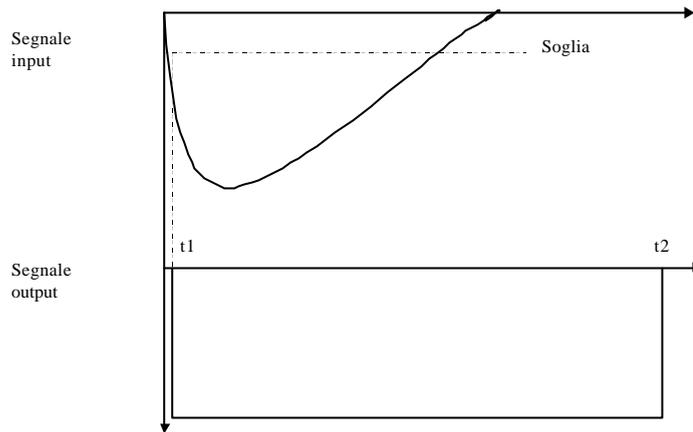
L'implementazione può far parte di un approfondimento.

## Approfondimento

### *Elementi che costituiscono il sincronizzatore*

*Non si discuteranno i singoli elementi, ma si presenteranno le peculiarità dei vari componenti. La catena elettronica, a blocchi, può essere schematizzata come segue.*

- *Il Fan in/out è un componente che riproduce in uscita su più linee (nello schizzo su due linee) lo stesso segnale di ingresso. Questo permette di poter usare il segnale sia come ingresso all'integratore sia per generare il segnale di start e stop dell'integrazione ( $t_1$  e  $t_2$ ).*
- *Il Ritardo permette di ritardare il segnale in modo da poterlo sistemare nell'intervallo voluto.*
- *Il Discriminatore è un componente che rileva tutte le volte che il segnale di ingresso supera (in valore assoluto) un valore di tensione che si preimposta. Nello schizzo seguente in figura 13 si fa vedere un esempio dove un segnale in ingresso supera la soglia predeterminata e in uscita parte un segnale proprio in corrispondenza del momento in cui l'ingresso supera la soglia. La durata del segnale in uscita può essere anch'essa regolata, e nel caso in esempio è di 750 ns. Il segnale è quindi inviato al blocco costituito da Integratore + ADC.*



**Figura 13.** Esempificazione del funzionamento di un discriminatore: quando il segnale di input supera una soglia impostata, in uscita viene 'alzato' un segnale che dura  $t_2 - t_1$ .

## Acquisizione dei dati

Si accenna ora al modo con cui i dati vengono passati dallo ADC al programma che lavora sul PC. Anche se è piuttosto complicato si può cercare di capirlo in modo intuitivo, che è quanto si cercherà di fare. L'analisi puntuale del funzionamento esula dallo scopo di queste note in quanto è piuttosto argomento di corsi di elettronica applicata.

Si può comunque pensare a due soluzioni entrambi possibili e valide.

1. Ogni volta che lo ADC ha terminato di convertire la carica in un numero, questi componenti presentano su una prescelta linea,  $S^{16}$ , un segnale. La linea  $S$  è una delle linee che lo ADC, attraverso la scheda, mette in comune con il PC. Se il programma che lavora sul Personal Computer controlla continuamente la linea  $S$  tutte le volte che trova un segnale su di essa eseguirà una successione di operazioni :

- va a leggere il numero in output allo ADC;
- riporta su un grafico il valore letto;
- azzerà lo ADC e riizzerà la linea  $S$ ;
- ritorna a controllare in modo continuo il segnale  $S$ , pronto per ripetere le due operazioni precedenti.

2. Ogni volta che in uscita del discriminatore si presenta un segnale, questo viene presentato sulla linea  $S$  del PC. Al solito il programma che lavora sul PC sta in ascolto. La successione delle operazioni è molto simile al caso precedente. L'unica differenza sta nel fatto che non si può leggere lo ADC immediatamente dopo che  $S$  è stato asserito. Infatti il tempo impiegato dallo ADC per fare la conversione ( passare da carica a numero ) non è trascurabile ma può essere di una decina di microsecondi. Quindi se non si attendesse un po' di tempo si leggerebbe lo ADC prima che questo abbia finito la conversione ottenendo valori completamente casuali. Quindi se si persegue questa soluzione occorre ritardare l'operazione di lettura di qualche decina di microsecondi.

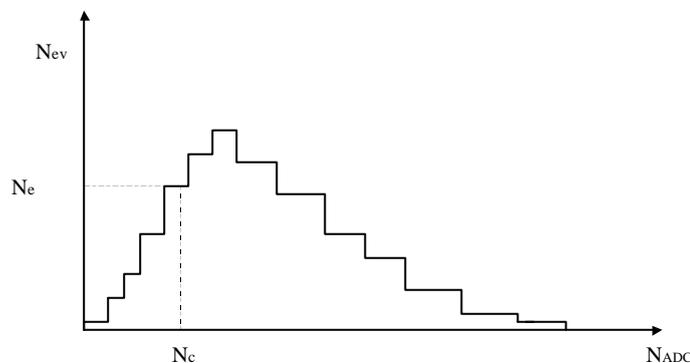
<sup>16</sup>  $S$  è un nome arbitrario; la linea che si usa dipende dal tipo di porta e di bus.

## Grafico della distribuzione di energia depositata

Si e' ormai pronti per capire il grafico della distribuzione di energia depositata da particelle che passano e/o si fermano nel rivelatore. Riassumiamo i passi per andare dal fenomeno fisico al numero che va a finire su un *istogramma* :

1. la particella deposita una quantita' di energia,  $E_i$ , nel rivelatore;
2. il rivelatore *traduce*  $E_i$  in una quantita' di luce blu,  $L_i$ , proporzionale a  $E_i$  :  $L_i = R \times E_i$ , essendo  $R$  la costante di proporzionalita' che vale, per un cristallo di NaI, 40000 fotoni/MeV;
3. una frazione quasi costante della luce emessa va a colpire il fotocatodo. La frazione dipende soltanto dalla geometria dell'accoppiamento rivelatore-fotocatodo;
4. i fotoni che incidono sul fotocatodo con una probabilita' del 20% estraggono degli elettroni dal fotocatodo;
5. gli elettroni vanno a colpire in sequenza i dinodi del fototubo, che sono tenuti a tensione via via crescente. Ad ogni dinodo il numero di elettroni aumenta fino a raggiungere valori sicuramente misurabili essendo il guadagno dell'ordine di  $10^6 - 10^7$ ;
6. il segnale dovuto agli elettroni che arrivano sull'anodo viene integrato ( in pratica si contano gli elettroni ) e tradotto in numero di conteggi ADC da componenti elettronici (integratore + convertitore ADC). Il coefficiente di conversione vale (tipicamente) 0.256 pC/conteggio ADC.

Ad ogni particella che attraversa il rivelatore viene fatto corrispondere un numero di conteggi ADC. Possiamo quindi costruire un istogramma mettendo sull'asse delle X il numero di conteggi e sull'asse delle Y il numero di volte che un evento e' caratterizzato da un dato numero di conteggi ADC.



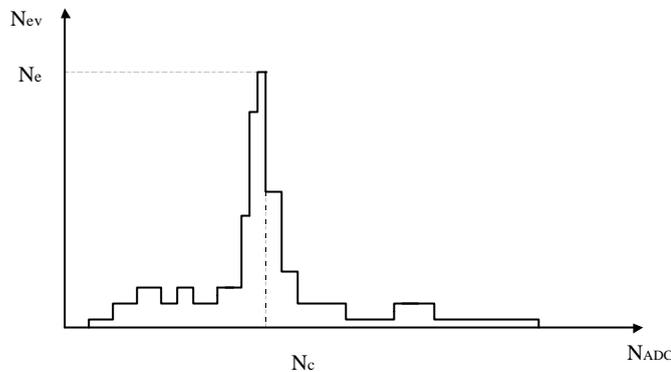
**Figura 14.** Esempio di distribuzione del numero di eventi in funzione dell'energia depositata

L'interpretazione del grafico in esempio (figura 14) e' la seguente: durante la presa dati,  $N_e$  particelle hanno depositato un'energia tale per cui, quando convertita in numero di conteggi ADC, corrisponde a  $N_c$  conteggi (talora chiamati anche *canali*) ADC.

Rimane ancora un punto importante: occorre collegare in modo certo il numero di canali ADC all'energia depositata. Infatti se ben si nota nell'elencare i passi per passare da energia depositata a conteggi ADC, ci sono stati alcuni passi che introducono coefficienti che non sono calcolabili o derivabili. Questo significa che occorre determinare in modo sperimentale la relazione fra *energia e conteggi ADC* : l'operazione e' detta *calibrazione*.

## Calibrazione

Il modo per effettuare la calibrazione è piuttosto ovvio: si prende una sorgente che emette fotoni di energia nota (ci sono tabelle molto accurate che forniscono per molteplici sorgenti radioattive il modo di decadimento) e si determina il numero di conteggi a cui corrisponde.



**Figura 15.** Esempio di distribuzione del numero di eventi in funzione dell'energia nel caso di sorgente per calibrazione.

Riferendoci alla figura 15, supponiamo che la sorgente radioattiva sia  $\text{Cs}^{137}$  (decade emettendo un fotone di 634 keV) e l'energia che deposita, 634 keV, corrisponde al picco che è centrato attorno a  $N_C$  (poniamo valga 750 canali ADC). Con questi dati si ha immediatamente la corrispondenza fra energia e conteggi: 634 keV  $\rightarrow$  750 conteggi ADC da cui 1 keV  $\rightarrow$  634 keV / 750 conteggi.

Ricordiamo che il guadagno della catena (634/750 keV/conteggi per intenderci) dipende da alcuni parametri:

- principalmente dal valore della tensione con cui si alimenta il fototubo: cambiando la tensione il guadagno cambia in maniera sostanziale;
- l'accoppiamento ottico fra rivelatore e fototubo. Smontando e rimontando il rivelatore sul fototubo non è sorprendente osservare variazioni della calibrazione di qualche percento;
- la stabilizzazione in temperatura del fototubo: fra il momento dell'accensione e l'effettiva presa dati è meglio attendere che il fototubo raggiunga una temperatura di equilibrio. Infatti il guadagno del fototubo dipende dalla temperatura. Anche questo effetto non supera qualche percento;
- infine, ma questo effetto è del tutto trascurabile, anche l'orientamento del fototubo rispetto al campo magnetico terrestre può cambiare seppur lievemente il guadagno.

## Presatura dati e analisi dati

Si è adesso pronti a considerare la presa dati e la successiva analisi.

Il rivelatore di NaI appare come un cilindro di alluminio (vedere la foto in figura 6) riempito da cristalli di NaI.



**Figura 16.** *Complessivo rivelatore costituito da fototubo e rivelatore NaI accoppiato. I due cavi che si intravedono (basso della foto) servono rispettivamente per portare la tensione (comunemente detta Alta Tensione poiche' si arriva a ~2000 Volt) e per prelevare il segnale.*

Una base del cilindro e' di vetro e questa verra' messa a contatto con la finestra del fotocatodo del fototubo.

Il montaggio rivelatore/fototubo e' fatto vedere nella fotografia di figura 16.

La luce emessa dal rivelatore attraverso le due finestre potra' arrivare al materiale fotosensibile e liberare elettroni.

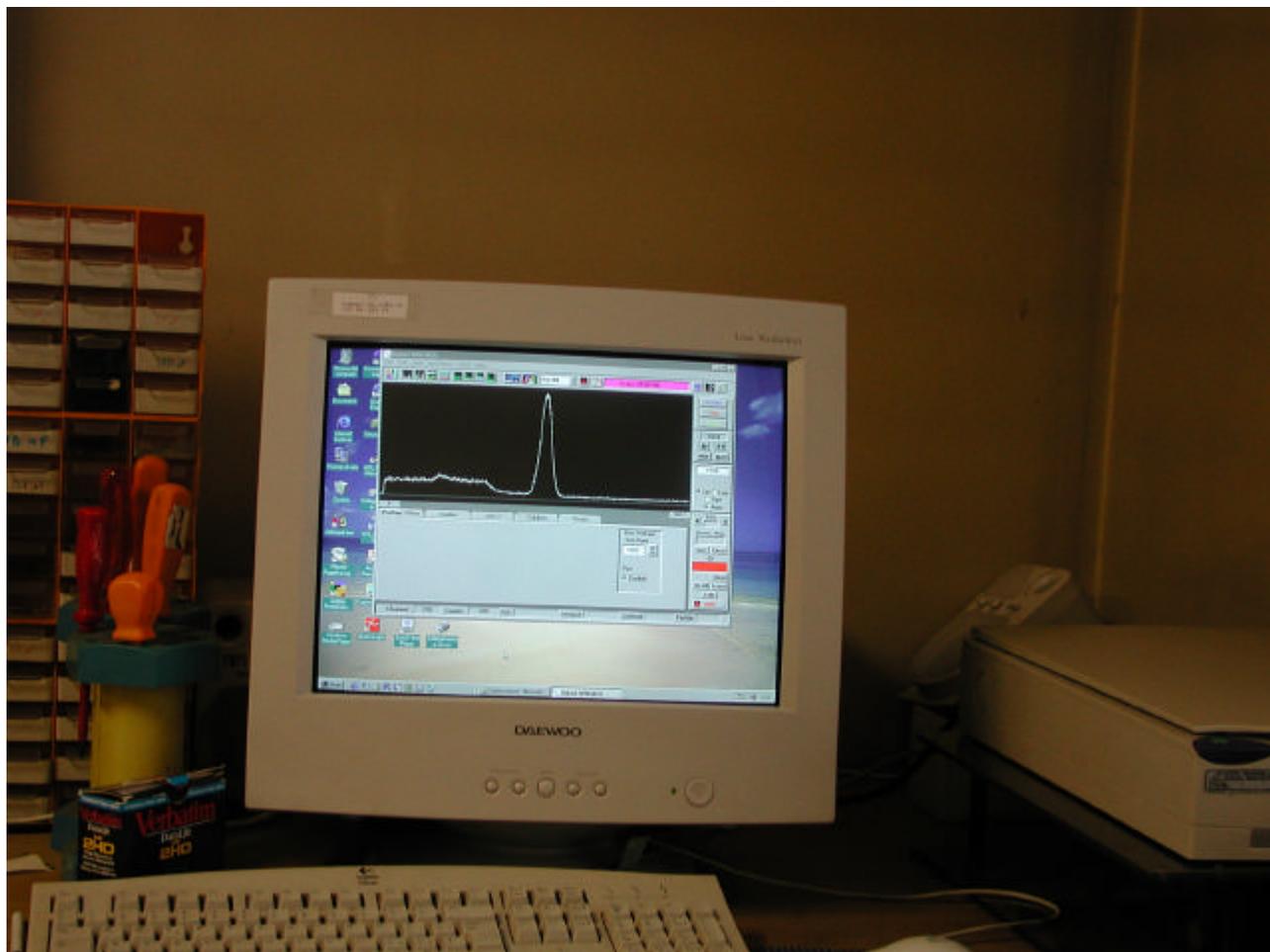
Occorre prestare una certa attenzione nel fare questo montaggio, poiche' deve essere a chiusura ermetica rispetto alla luce. Infatti se luce ambientale penetrasse, questa andrebbe a sommarsi con la luce emessa dal rivelatore falsando la misura. Ci sono diversi modi per assicurarci che il montaggio e' stato fatto efficientemente, il piu' semplice consiste nell'avvolgere in un panno nero il sistema rivelatore/fototubo. Se il montaggio e' adeguato questa ulteriore precauzione non dovrebbe avere alcun effetto sullo spettro che si misura. Contrariamente se la distribuzione di carica cambia forma in modo evidente significa che vi era una fessura dalla quale entrava luce e che il panno ha fermato.

La presa dati si effettua in due fasi: calibrazione e misura.

### **Procedura di calibrazione**

- Si alimenta il fototubo con una tensione indicativa dipendente dalle caratteristiche del fototubo e normalmente indicate dal costruttore
- Si attende 10-15 minuti per la stabilizzazione in temperatura.

- Si pone una sorgente a contatto con il rivelatore e si acquisiscono dati per qualche minuto. La procedura per iniziare l'acquisizione e eventualmente fermarla non viene descritta in questa nota poiché dipende dal sistema usato. Per fare questo occorre consultare il manuale.



**Figura 17.** Foto della distribuzione di energia ottenuta con una sorgente di 511 keV.

Un picco prominente apparirà in corrispondenza dell'energia della sorgente usata. Nel nostro caso si è usata una sorgente di  $\text{Na}^{22}$  che decade  $\beta^+$  (emette un positrone,  $e^+$ ). Il positrone ha energia piuttosto bassa, pari a 0.545 MeV e si ferma nella sorgente stessa o nell'involucro <sup>17</sup>. A fine percorso il processo più probabile che avviene è il seguente: il positrone ormai quasi fermo urta un elettrone atomico e si annichila. I prodotti dell'annichilazione sono due fotoni di energia pari a 511 keV ciascuno e con direzione opposta. Nella fotografia in figura 17 si fa vedere un esempio di distribuzione così come si ottiene dalla calibrazione

Si aggiusta la tensione inviata al fototubo in modo da posizionare il picco al valore voluto. Lo spostamento del picco è possibile poiché si sta variando il guadagno cambiando la tensione al fototubo. In principio ogni valore di picco è lecito; può essere conveniente però sistemare il picco relativo a 511 keV intorno al conteggio ADC pari a 511. Questo accorgimento semplifica il calcolo poiché permette di sfruttare l'uguaglianza: 1 keV = 1 conteggio ADC.

- Ogni volta che si cambia tensione occorre azzerare la distribuzione precedente. Se non si segue una procedura *intelligente* nella ricerca della tensione di lavoro si può perdere

<sup>17</sup> Il percorso di positroni di 0.545 MeV in acqua è di frazione di mm. In altri termini il positrone viene rallentato da successivi urti con gli elettroni atomici e dopo qualche decimo di millimetro è praticamente fermo.

molto tempo. Il modo piu' semplice e' quello di acquisire alcuni punti cambiando ogni volta la tensione di una decina di volt, ovviamente annotando tensione e posizione del picco. Si potra' a quel punto stimare il valore corretto della tensione. Si notera' che la relazione fra guadagno (posizione del picco) e tensione e' tutt'altro che lineare ma e' un esponenziale. Invece, per variazioni relativamente piccole della tensione, la relazione fra variazione relativa di guadagno e variazione relativa di tensione e' lineare. La frase precedente espressa in forma algebrica suonera' come:  $\Delta P/P = k \Delta V/V$ , ove con  $\Delta P$  e  $\Delta V$  si identificano le variazioni della posizione del picco  $P$  e della tensione  $V$ , rispettivamente. Con  $P$  e  $V$  si indicano la posizione del picco e tensioni corrispondenti. Infine  $k$  e' un coefficiente di proporzionalita' che e' circa uguale al numero di dinodi del fototubo (nel nostro caso vale circa 10).

## Procedura per la misura della radioattivita' ambientale

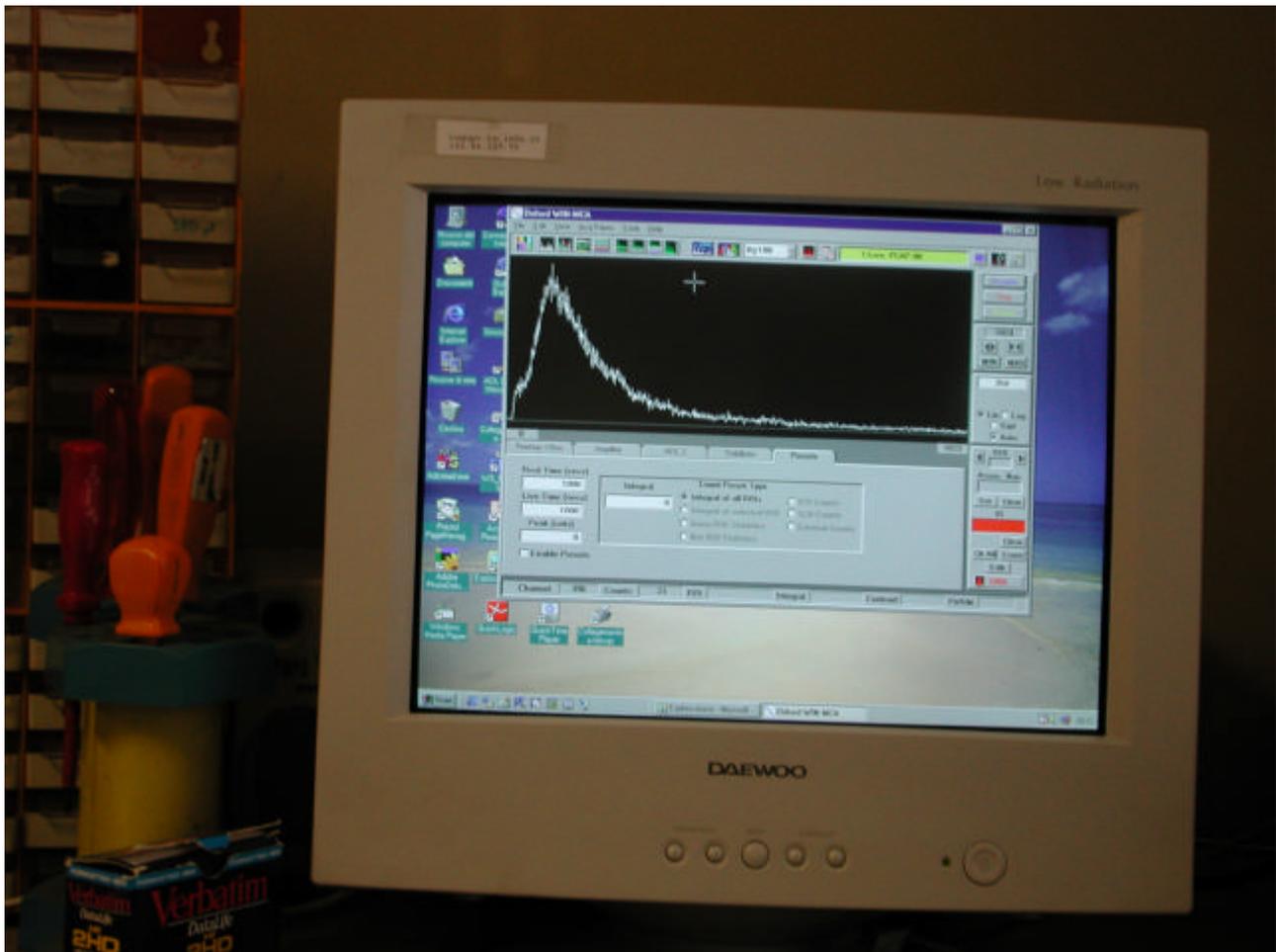
Si e' calibrato il sistema determinando la relazione energia depositata-conteggi ADC. Si puo' procedere alla misura.

- Si toglie la sorgente dai pressi della strumentazione.
- Si imposta la tensione stimata con la procedura di calibrazione. Nel frattempo il fototubo e' in temperatura.
- Si pone il rivelatore + fototubo nell'area in cui si vuole misurare la radioattivita'.
- Si fa partire la presa dati seguendo le istruzioni allegate al sistema di acquisizione.
- La presa dati si fara' terminare dopo un intervallo di tempo dell'ordine di 30 minuti. Questa durata ci permette di avere una statistica sufficiente per fare delle stime ragionevoli della radioattivita' presente.

La distribuzione di energia rilasciata assomigliera' allo spettro mostrato in figura 18. Essa e' dovuta alla somma di piu' contributi che non possono pero' essere facilmente separati e che in totale corrispondono alla attivita' che si vuole misurare. I contributi, come si era discusso all'inizio di questa nota, sono:

- raggi cosmici : particelle molto energetiche ( da centinaia di MeV e fino a molti GeV;
- decadimento di elementi radioattivi che sono per lo piu' presenti nei muri (mattoni e cemento) e in ogni altro materiale che ci circonda. Le particelle prodotte dal decadimento sono per la maggior parte fotoni ( decadimento  $\gamma$  ), elettroni/positroni (decadimento  $\beta$  ), oppure nuclei di Elio,  $He^4$  ( decadimento  $\alpha$  ). In tutti i casi l'energia di queste particelle e' relativamente piccola e si estende al piu' fino a qualche MeV a seconda della sorgente.

Mediamente i raggi cosmici, che sono maggiormente energetici, non sono fermati completamente dal rivelatore, a differenza dei prodotti di decadimento che per la maggior parte verranno frenati fino a fermarsi nel cristallo di NaI.



**Figura 18.** Foto della distribuzione di energia nel caso di presa dati per la misura della radioattività ambientale.

## 6. Analisi dei dati e stima della radioattività ambientale

Si può seguire un esempio realistico. La distribuzione di energia depositata si può tradurre in una tabella che fornisce il numero di eventi per ogni energia o meglio per ciascun intervallo di energia.

Useremo la convenzione per cui la colonna delle energie riporta il valore centrale dell'intervallo. Specificatamente, se si considera l'intervallo fra 100 e 110 keV sulla tabella si riporterà 105 keV come valore centrale. Per maggior completezza alla tabella aggiungeremo una terza colonna nella quale si riporterà l'ampiezza dell'intervallo. Questo ci permetterà di maneggiare intervalli di ampiezza variabile senza fare errori.

I numeri da inserire nella tabella saranno disponibili soltanto dopo la presa dati e si estrarranno dal grafico del numero di eventi in funzione dell'energia che viene visualizzato dal programma di acquisizione. Per continuare la discussione, si assumeranno valori ragionevoli pur tuttavia inventati.

| Numero di eventi nell'intervallo | Valore centrale Energia (keV) | Intervallo di energia (keV) |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 2500                             | 50                            | 100                         |
| 1500                             | 150                           | 100                         |
| 1000                             | 250                           | 100                         |
| 800                              | 350                           | 100                         |
| 700                              | 450                           | 100                         |
| 500                              | 550                           | 100                         |
| 300                              | 700                           | 200                         |
| 150                              | 1000                          | 400                         |
| 20                               | 1600                          | 800                         |

Esaminiamo con cura che cosa significhi la tabella e si consideri per questo la prima riga: nell'intervallo temporale durante il quale sono stati acquisiti i dati 2500 *eventi* (chiamiamo evento un processo completo dovuto ad una particella che passa nel rivelatore) hanno depositato una energia compresa fra 0 e 100 keV. Infatti il *bin* (nome alternativo a *intervallo*) di energia e' centrato a 50 keV e ha ampiezza 100 keV. Ricordiamo che il sistema di acquisizione lavora sempre in bin di conteggi ADC (intervalli di conteggi ADC) che, in questo esempio, sono stati trasformati in energia. Quindi per essere completi occorre dire che si parte da un *Valore centrale* che e' espresso in conteggi ADC e analogamente per l'intervallo. Si e' poi trasformato la tabella passando da conteggi ADC a energia espressa in keV usando il coefficiente di calibrazione determinato.

Per chi e' piu' familiare con Analisi matematica, per determinare l'energia totale dissipata dovremmo fare un *integrale* :  $\int N(E) dE$ . Non si conosce l'espressione analitica di  $N(E)$  e quindi si e' costretti o meglio risulta molto piu' facile passare ad una soluzione di tipo *numerico* dove si approssima  $N(E)$  ad una spezzata che cambia pendenza ai limiti dell'intervallo. Con questa approssimazione possiamo dire che l'energia totale corrispondente al primo intervallo vale:  $2500 \times 50 \text{ keV} = 125000 \text{ keV}$ , per gli altri intervalli si procede in modo analogo. Possiamo aggiungere una colonna alla tabella precedente dove introduciamo l'energia totale per ciascun intervallo.

| Numero di eventi nell'intervallo | Valore centrale Energia (keV) | Intervallo di energia (keV) | Energia totale per bin (keV) |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 2500                             | 50                            | 100                         | 125000                       |
| 1500                             | 150                           | 100                         | 225000                       |
| 1000                             | 250                           | 100                         | 250000                       |
| 800                              | 350                           | 100                         | 280000                       |
| 700                              | 450                           | 100                         | 315000                       |
| 500                              | 550                           | 100                         | 275000                       |
| 300                              | 700                           | 200                         | 210000                       |
| 150                              | 1000                          | 400                         | 150000                       |
| 20                               | 1600                          | 800                         | 32000                        |

Sommando i valori dell'ultima colonna si trova 1862000 keV, che corrisponde al totale dell'energia rilasciata nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ . Calcoliamo la massa,  $M$ , del rivelatore, sapendo che la densità dello NaI vale  $3.67 \text{ gr/cm}^3$ , e il volume è dato da (volume di un cilindro) :  $\pi/4 d^2 h$ , ove  $d$  è il diametro in cm e  $h$  è l'altezza sempre in cm.

Per il rivelatore in uso si ha che:  $d = h = 2'' = 2.54 \text{ cm} \times 2 = 5.08 \text{ cm}$ .

$$M = 3.67 \text{ gr/cm}^3 \times 103 \text{ cm}^3 = 378 \text{ gr}$$

La dose  $D$  vale  $1862000 \text{ keV} / 378 \text{ gr}$ . L'unità di misura non è delle più felici e per confrontarla con valori in Gray occorre trasformarla in Joule/kg sapendo che  $1 \text{ Joule/kg} = 6.24 \times 10^{12} \text{ MeV/kg}$ . Si sa inoltre che  $1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV}$ , quindi :  $D = 1862000 \text{ keV} / 378 \text{ gr} = 1862 \text{ MeV} / 0.378 \text{ kg} = 7.9 \times 10^{-10} \text{ Gy}$ .

Se vogliamo confrontarla con la dose tipica annuale, occorre scalare il valore ottenuto tenendo conto dell'intervallo temporale durante il quale si è fatta l'acquisizione. Supponiamo che i valori in tabella siano stati presi in 1 minuto, dovremo moltiplicare il risultato per il numero di minuti in un anno ( $60 \times 24 \times 365 = 525600$ ), da cui  $D / \text{anno} = 7.9 \times 10^{-10} \times 525600 = 4.15 \times 10^{-4} \text{ Gy/anno} = 0.415 \text{ mGy/anno}$ . Confrontandola con i valori medi di radioattività ambientale che vanno da 0.4 a 4 mGy/anno, si potrebbe concludere che la zona dove si è eseguita la misura si colloca verso il basso rispetto ai valori attesi.

## Sommario.

*Ricapitoliamo ora i punti principali affrontati in questa nota.*

*Cominciamo col riassumere la parte introduttiva.*

- 1. Le radiazioni ionizzanti sono dovute a particelle che attraversano la materia e cedendo parte della loro energia ionizzano gli atomi con cui interagiscono.*
- 2. Le sorgenti delle radiazioni sono sia di carattere naturale, raggi cosmici o decadimento di elementi radioattivi che esistono in natura, che artificiali. Le sorgenti artificiali sono da addebitare per lo più a esami radiodiagnostici e radioterapia.*
- 3. La grandezza con cui si misura la quantità di radiazione e' dose definita come  $E/M$  ove  $E$  e' l'energia depositata nella massa  $M$ . Il Gray (Gy) e' l'unità di misura attualmente usata.*
- 4. Il meccanismo con cui la radiazione può causare danni biologici passa attraverso la rottura delle catene molecolari del DNA.*
- 5. E' possibile misurare la radiazione con una strumentazione relativamente semplice. Anche la procedura di misura e' comprensibile e non sono necessarie teorie troppo complesse.*

*Passiamo ora a ricapitolare la strumentazione.*

- 1. Sono stati introdotti due tipi diversi di contatori: Geiger e scintillatore inorganico NaI.*
  - Il Geiger e' costituito da un cilindro metallico riempito con aria dove un filo metallico e' situato nell'asse del cilindro. Il cilindro e il filo costituiscono gli elettrodi e sono polarizzati con una tensione dell'ordine di 1000 V. Le particelle che attraversano il cilindro ionizzano l'aria. Le cariche liberate vengono accelerate: elettroni verso l'anodo, ioni positivi verso il catodo. Per effetto del campo elettrico molto elevato nei pressi del filo si innesca un processo di moltiplicazione. Connettendo l'anodo ad una opportuna catena elettronica si può contare il numero di particelle che attraversano il volume di gas. Misurato un conteggio nell'unità di tempo e assumendo l'energia media rilasciata da ciascuna particella si può calcolare l'energia rilasciata nel volume e di conseguenza la dose. I contatori Geiger commerciali sono già stati calibrati e riportano una tabella che in funzione della frequenza di conteggi (conteggi nell'unità di tempo) forniscono la dose.*

- *Il contatore basato su scintillatore inorganico NaI e' piu' complesso. Il rivelatore trasduce l'energia rilasciata da una particella che attraversa il rivelatore in luce blue. Un fototubo otticamente connesso traduce la luce in elettroni e ne moltiplica il numero ( $10^6 - 10^7$ ). La carica che si raccoglie in uscita al fototubo e' proporzionale alla luce e in ultima analisi all'energia depositata nel rivelatore. Quindi misurando la carica si misura direttamente l'energia. L'energia rilasciata nell'unita' di tempo si otterra' sommando le energie rilasciate dalle particelle che passano nello stesso intervallo di tempo.*
2. *La strumentazione elettronica per misurare la carica nel caso dello scintillatore inorganico e' complessa e ha occupato diverse pagine. In sintesi: il segnale all'uscita del fototubo deve essere integrato. Infatti le cariche arrivano sparse in funzione del tempo in un intervallo di ~750 nsec e, ma questa e' un'ovvieta', per conoscere la carica totale occorre sommarle su tutto l'intervallo. Quindi il primo stadio e' un*
- **integratore** : *riceve in ingresso una carica, l'uscita e' una tensione che e' proporzionale alla carica totale.*
- Il secondo stadio e' un*
- **ADC**: *riceve in ingresso l'uscita dello integratore quindi una tensione e la traduce in un numero digitale.*
- Un insieme di componenti che abbiamo chiamato*
- **sincronizzatore** *definisce i limiti temporali dell'operazione di integrazione. In altre parole fornisce all'integratore un segnale di start ed uno stop entro i quali integra la carica.*
- Infine lo ADC mette il risultato a disposizione del PC attraverso il bus.*
3. *Sul PC vi e' un programma che legge i dati in uscita dello ADC e li presenta su un istogramma. Il programma stesso permette di elaborare i dati in diversi modi. La presa dati e' fatta di due tempi:*
- **calibrazione**. *Una sorgente radioattiva che emette radiazione di energia nota viene misurata. I conteggi ADC corrispondenti al picco della distribuzione degli eventi in funzione del numero di conteggi sono uguagliati all'energia della sorgente. Con questa operazione si determina il coefficiente di calibrazione che lega conteggi ADC a energia.*
  - **misura radioattivita' ambientale**. *Si pone il rivelatore nell'ambiente che si vuole monitorare e si accumulano dati per un tempo prefissato. Dalla distribuzione degli eventi in funzione dell'energia si puo' determinare con una semplice somma l'energia totale rilasciata nel rivelatore. E' quindi immediato passare da energia totale, massa del rivelatore e intervallo della presa dati alla dose annuale.*