



Principi di rivelazione

Dott.ssa Alessandra Bernardini

Rivelatori attivi e passivi

- **I rivelatori attivi:** sono strumenti elettronici in grado di misurare istantaneamente il livello e l'entità della radiazione presente.
- **I rivelatori passivi:** sono quei dispositivi che non necessitano di alimentazione elettrica perché non danno una risposta immediata. Vengono sottoposti a processi chimico fisici successivi alla esposizione per la determinazione della grandezza fisica media nel periodo di integrazione.

Rivelatori attivi

- Rivelatori a gas (c. ionizzazione, c. proporzionale, c. Geiger-Muller)
- Rivelatori a cristallo scintillante
- Rivelatori allo stato solido (es. NaI, Ge)

Rivelatori passivi

- Dosimetri a termoluminescenza
- Dosimetri a pellicola fotografica
- Dosimetri chimici

Rivelatori attivi

- Caratteristiche di un rivelatore attivo:
 - Statistica di conteggio
 - Sensibilità
 - Risoluzione energetica
 - Funzione di risposta
 - Efficienza di rivelazione
 - Risoluzione spaziale



Statistica di conteggio

- Molte delle tecniche di rivelazione attiva si basano sul conteggio delle particelle emesse durante i decadimenti radioattivi o delle particelle cariche messe in moto dalla radiazione indirettamente ionizzante.
- La natura di questi eventi è di tipo casuale, pertanto viene ben descritta da una **distribuzione di tipo binomiale**.

$$(p + q)^n = p^n + np^{n-1}q + \frac{n(n-1)}{2!}p^{n-2}q^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}p^{n-3}q^3 + \dots$$

- Dove **n** è il numero degli eventi, **p** è la probabilità che l'evento si verifichi e **q** è la probabilità che l'evento non si verifichi.
- Se consideriamo il lancio di un dado e la probabilità di ottenere 1 per un numero di lanci (eventi) pari a 3 si avrà:

Probabilità di ottenere 3 volte 1 $\rightarrow P(3) = p^n = \left(\frac{1}{6}\right)^3 = \frac{1}{216}$

2 volte 1 $\rightarrow P(2) = np^{n-1}q = 3 \times \left(\frac{1}{6}\right)^2 \times \frac{5}{6} = \frac{15}{216}$

1 volta 1 $\rightarrow P(1) = \frac{n(n-1)}{2!}p^{n-2}q^2 = \frac{3(2)}{2 \cdot 1} \times \left(\frac{1}{6}\right) \times \left(\frac{5}{6}\right)^2 = \frac{75}{216}$

0 volte 1 $\rightarrow P(0) = \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}p^{n-3}q^3 = 1 \times 1 \times \left(\frac{5}{6}\right)^3 = \frac{125}{216}$

Sviluppo in serie

- Lo sviluppo in serie della distribuzione binomiale:

$$P(x) = \frac{n!}{(n-x)! x!} p^x (1-p)^{n-x}$$

- Parametri utili della distribuzione binomiale:

- Valor medio $\bar{x} = p \cdot n$
- Deviazione standard $\sigma_b = \sqrt{n \cdot p \cdot q}$

- Comportamenti limite:

- $n \rightarrow \infty$ $P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$ (distribuzione gaussiana)

- $n \rightarrow \infty$ $P(x) \rightarrow 0$ $P(x) = \frac{(p \cdot n)^n \times e^{-p \cdot n}}{x!}$ (d. di Poisson)
[dove $n \cdot P(x)$ è finito]

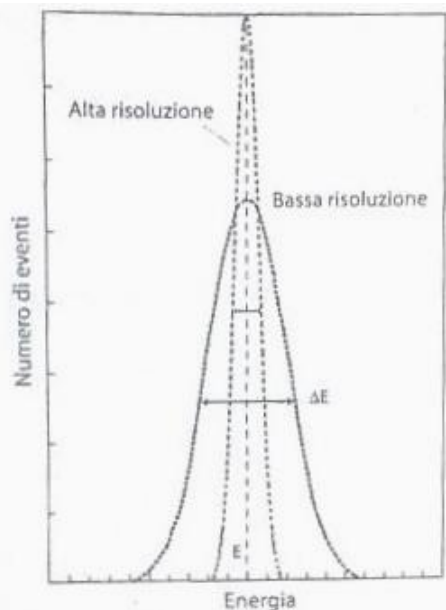
- La distribuzione di Poisson ben descrive il comportamento delle radiazioni dove n è il numero delle ionizzazioni e $P(x)$ è la probabilità di interazione della singola particella.

Sensibilità

- È la variazione minima della grandezza in esame, che lo strumento è in grado di apprezzare.
- Nel campo delle radiazioni ionizzanti è legata alla energia minima che deve essere depositata all'interno dello strumento affinché questo sia in grado di produrre un segnale in uscita.
- La quantità minima di energia è a sua volta legata a:
 - Sezione d'urto dei processi di interazione radiazione –materia
 - Rumore intrinseco dello strumento, legato all'elettronica.
 - Dimensioni e massa del rivelatore (la rivelazione di particelle neutre richiede grandi volumi)
 - Materiali di rivestimento della zona attiva dello strumento.

Risoluzione energetica

- Alcuni degli strumenti di misura danno come risposta la distribuzione energetica della radiazione incidente.
- La risoluzione energetica di un rivelatore rappresenta la capacità dello stesso di separare due eventi energeticamente vicini.
- A causa della fluttuazione statistica si avrà che la risposta di questi strumenti non sarà mai a delta di Dirac ma piuttosto una gaussiana centrata attorno ad un determinato valore di energia.



$$R = \frac{\Delta E}{E} \text{ (risoluzione energetica)}$$

Larghezza a metà altezza

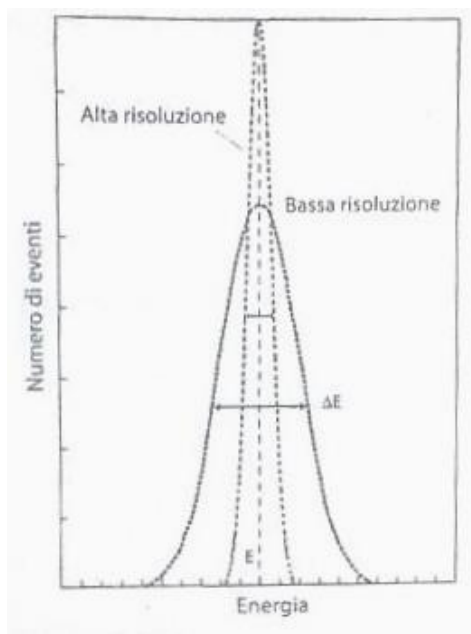
Valor medio

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma_E$$

La risoluzione di uno strumento non è una caratteristica fissa ma tende a variare con l'energia. Tipicamente è maggiore all'aumentare dell'energia.

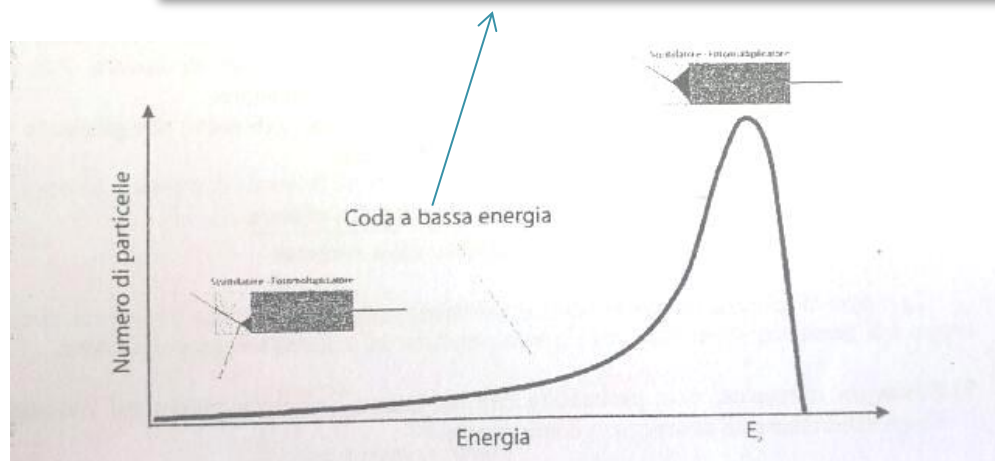
Funzione di risposta – particelle cariche

- Rappresenta la forma dell'impulso che un rivelatore produce in uscita quando investito da un fascio monocromatico.
- È legata alla risoluzione energetica.



Funzione di risposta per particelle cariche pesanti

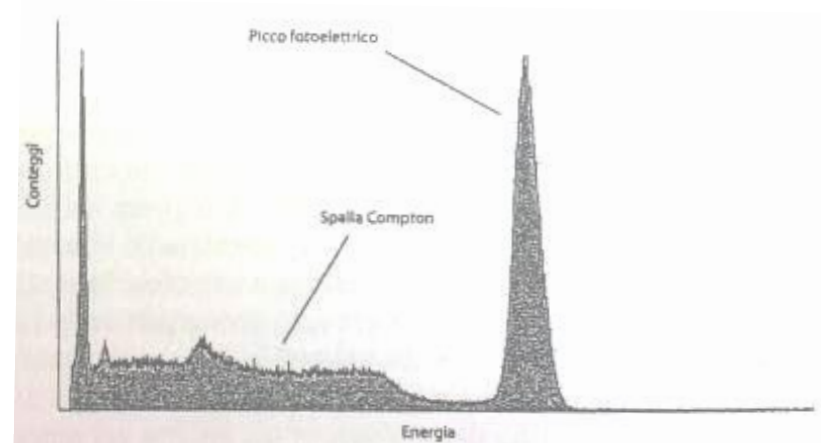
Non tutti gli elettroni riescono a rilasciare la propria energia all'interno del rivelatore



Funzione di risposta per elettroni

Funzione di risposta - fotoni

- Nel caso di fotoni la funzione di risposta avrà un aspetto diverso a seconda dell'energia.
- Se prevale l'effetto fotoelettrico, la funzione avrà l'aspetto di una gaussiana centrata nel valore di energia dei fotoni incidenti.
- Se prevale l'effetto Compton gli elettroni producono una coda continua verso le basse energie (spalla Compton).
- A energie elevate in cui prevale la creazione di coppie, lo spettro è caratterizzato da un picco a 1,022 MeV dovuto all'annichilazione del positrone con gli elettroni del mezzo.



Efficienza di rivelazione

- È la caratteristica per cui un fotone emesso dalla sorgente di radiazione venga effettivamente conteggiato dallo strumento.
- **Efficienza geometrica**: questo tipo di efficienza dipende dall'angolo solido sotteso dal sistema sorgente-rivelatore

$$\epsilon_{geo} = \frac{\text{Particelle che giungono sul rivelatore}}{\text{Particelle emesse dalla sorgente}}$$

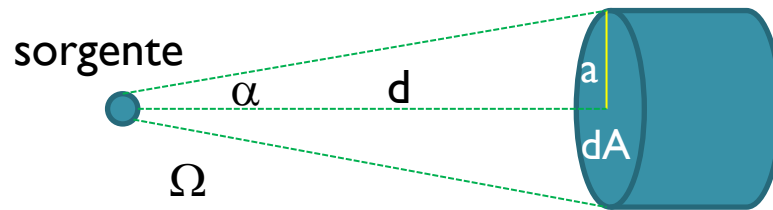
- **Efficienza intrinseca**: è la probabilità che un fotone che giunge sul rivelatore venga effettivamente conteggiato

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{Eventi rivelati}}{\text{Particelle che giungono sul rivelatore}}$$

- **Efficienza totale del sistema**:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{int} \epsilon_{geo}$$

Efficienza di rivelazione - angolo solido di rivelazione



- L'angolo solido è definito da un integrale calcolato sulla superficie del rivelatore, posto ad una distanza r dalla sorgente:

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA$$

- Nel caso più semplice di sorgente puntiforme e rivelatore a sezione circolare:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right)$$

Risoluzione temporale

- È la capacità di distinguere due particelle che giungono sul rivelatore contemporaneamente.
- L'intervallo minimo necessario affinché un secondo evento venga registrato si chiama: tempo morto.
- Il tempo di interdizione può essere dovuto sia al processo fisico di rivelazione sia all'elettronica del sistema di acquisizione.

Correzione alla frequenza di conteggi

$$C = N - n_r$$

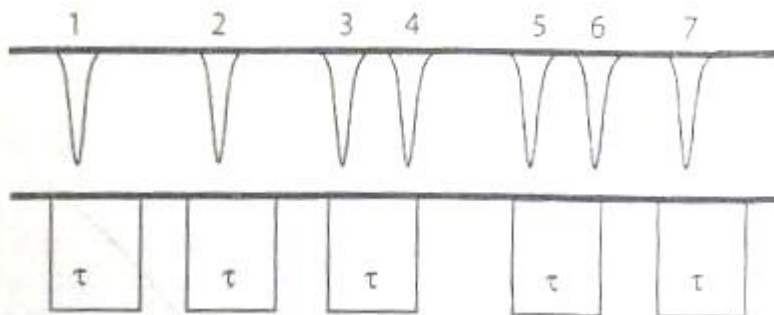
$$C = N \cdot n \cdot \tau$$

C = nr di conteggi persi

N = frequenza reale degli impulsi

n = frequenza degli impulsi registrati

τ = tempo morto



$$N - n_r = N \cdot n \cdot \tau$$

$$N = \frac{n_r}{1 - n\tau} \quad \text{Nr reale di conteggi}$$

Rivelatori a gas

- Grazie all'elevata mobilità ionica il gas si presta molto bene a rivelare la radiazione ionizzante
- La radiazione che entra nel rivelatore ionizza il gas presente creando una coppia di ioni.
- Gli ioni + andranno lentamente verso il catodo mentre gli ioni – saranno accelerati verso l'anodo.
- Il flusso degli ioni – sarà misurato come una corrente elettrica. Il segnale in uscita è quindi proporzionale alla radiazione incidente e alla energia depositata da questa nel gas.



$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

diametro catodo
diametro anodo

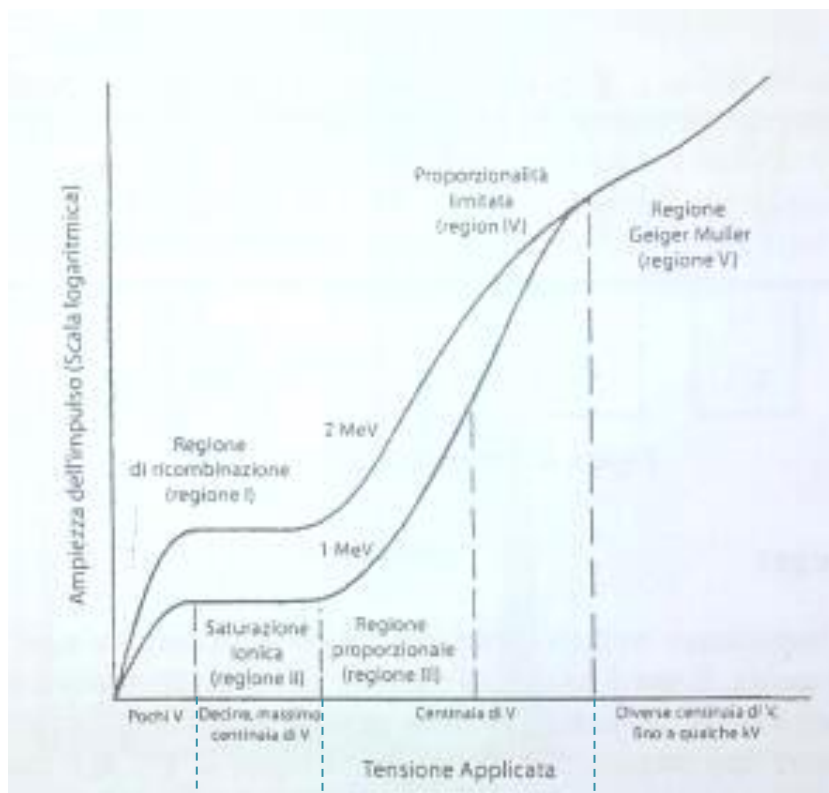
r = distanza dall'anodo

$$S = K \cdot Q \propto \int_0^t i(t) dt$$

K = costante
 Q = carica netta

Regione di funzionamento rivelatori a gas

- A seconda della tensione applicata tra gli elettrodi si distinguono diversi regimi di funzionamento.



- A seconda della tensione applicata tra gli elettrodi si distinguono diversi regimi di funzionamento.
- Zona I: di ricombinazione
- Zona II: di saturazione
- Zone III, IV: di proporzionalità
- Zona V: di Geiger-Müller

100 ÷ 400
Volt

400 ÷ 800
Volt

800 ÷ 1200
Volt

Caratteristiche e importanza delle finestre

- Le finestre degli strumenti a gas sono fatte di Mylar, mica o quarzo e vengono opacizzate con vernici scure per evitare che la luce entri nello strumento.
- A seconda dello spessore delle finestre passano solo certe radiazioni: per spessori «elevati» la radiazione α e β non passa; per rilevare radiazione γ di alta energia è invece necessario aumentare lo spessore delle finestre affinché la radiazione perda la propria energia all'interno del volume sensibile.
- In certi strumenti lo spessore della finestra può essere variato rimuovendo le apposite protezioni.

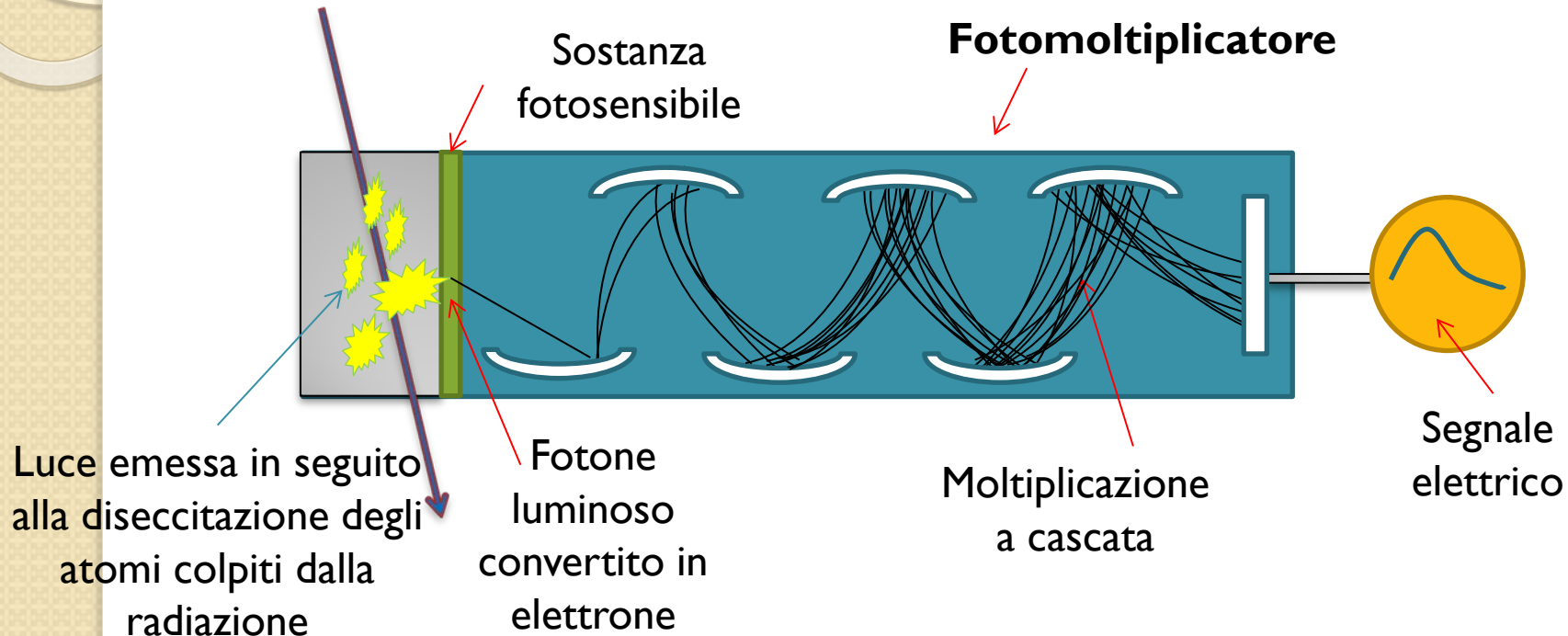
Gas utilizzati

- **Camera a ionizzazione**: poiché gli elettroni hanno una più alta velocità di deriva si devono evitare tutti quei gas con una elevata elettronegatività (capacità di attrarre elettroni). I gas più utilizzati: argon, azoto, anidride carbonica, idrogeno e metano. Oppure soluzione di argon (95%) e anidride carbonica (5%).
- **Contatori proporzionali**: solitamente si utilizza argon miscelato a gas poliatomici come il metano o l'alcool oppure inorganici come il CO_2 o il BF_3 come gas di quenching.
- **Contatori Geiger- Muller**: solitamente argon, krypton e xeno.

Quando utilizzare i rivelatori a gas

- **Camera a ionizzazione**: vengono utilizzate prevalentemente per misurare flussi di radiazione anziché impulsi provenienti da singole particelle. Sono predominanti nella misura della radiazione diffusa dai raggi X su vari materiali.
- **Contatori proporzionali**: utilizzati nella rivelazione dei raggi X di bassa energia e per elettroni di bassissima energia.
- **Contatori Geiger- Muller**: sono molto sensibili e per questa caratteristica sono impiegati per contare radiazione a basso poter di ionizzazione.

Rivelatori a scintillazione



Lo scintillatore più comune: NaI(Tl)

- Lo Ioduro di Sodio (NaI) è stato il primo tipo di scintillatore utilizzato su larga scala.
- Il segnale luminoso prodotto è particolarmente intenso (occorrono solo 25 eV per produrre un fotone luminoso)
- Il cristallo viene 'drogato' con Tallio (Tl) per introdurre difetti reticolari e quindi centri luminescenti.
- I cristalli di NaI sono attualmente utilizzati nella scintigrafia (Gamma Camera) e nei monitor di elevata sensibilità.
- Il segnale prodotto è proporzionale alla energia della radiazione: è utile per effettuare analisi spettrometriche
- Lo NaI è fortemente igroscopico (è parente del NaCl)

Scintillatori liquidi e plastici

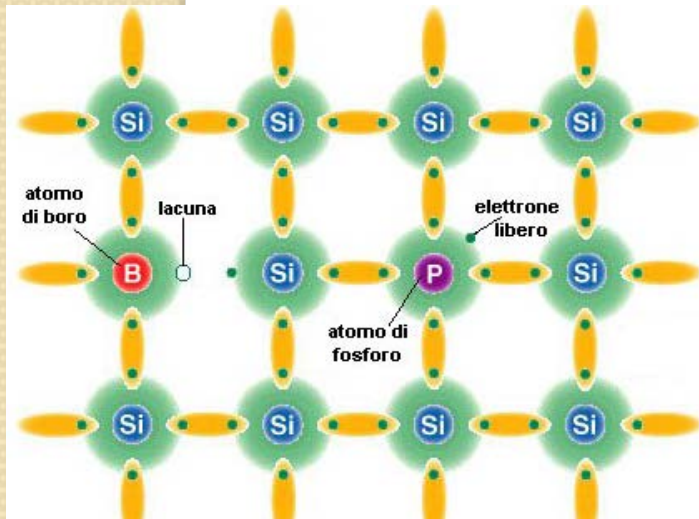
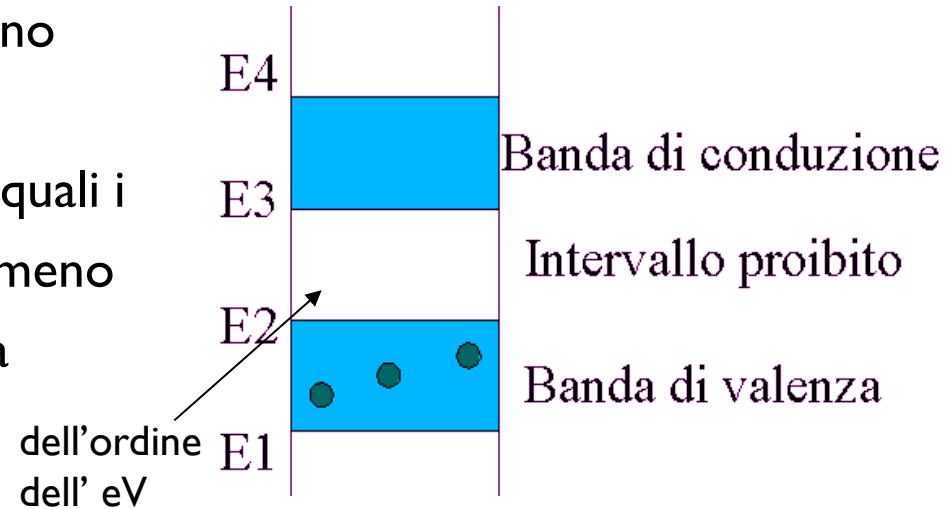
- Esistono molte molecole organiche che presentano il fenomeno della scintillazione
- La sostanza scintillante più conosciuta è il Benzene (C_6H_6)
- Le analisi di datazione con $C14$ vengono effettuate 'costruendo' il Benzene con il Carbonio del campione da analizzare
- Il Benzene è tossico e si tende a sostituirlo con altri tipi di sostanze scintillanti
- Si costruiscono scintillatori plastici miscelando una sostanza scintillante con plexiglass, gli scintillatori plastici sono facilmente lavorabili e sono usati soprattutto in esperimenti di fisica delle particelle.

Perché si usa lo scintillatore liquido per la misura dei β ?

- Le particelle β vengono facilmente schermate da spessori sottili di materiale, i rivelatori con pareti metalliche non sono adatti allo scopo.
- Nel contatore a scintillazione liquida (LSC) la sorgente radioattiva e il rivelatore sono a stretto contatto senza pareti di separazione
- Tutte le particelle β emesse dal campione producono luminescenza, più o meno intensa. Fissando una 'soglia' si rivelano le particelle di energia superiore a un minimo.
- Gli svantaggi nel metodo sono :
 1. Possibili contaminazioni
 2. Produzione di rifiuti radioattivi liquidi
- Il dispositivo utilizzato con gli scintillatori liquidi si chiama **β -counter**

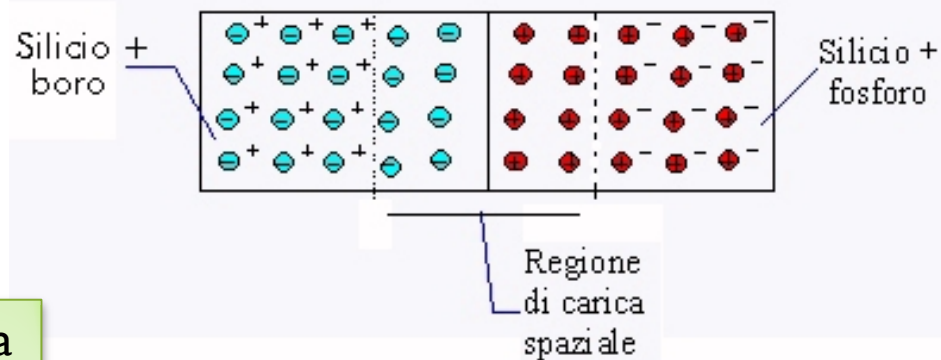
Rivelatori a stato solido

- I rivelatori a stato solido possono essere costruiti con materiali semiconduttori (es. Silicio), nei quali i livelli energetici degli elettroni meno legati mostrano la caratteristica struttura a bande dei cristalli.

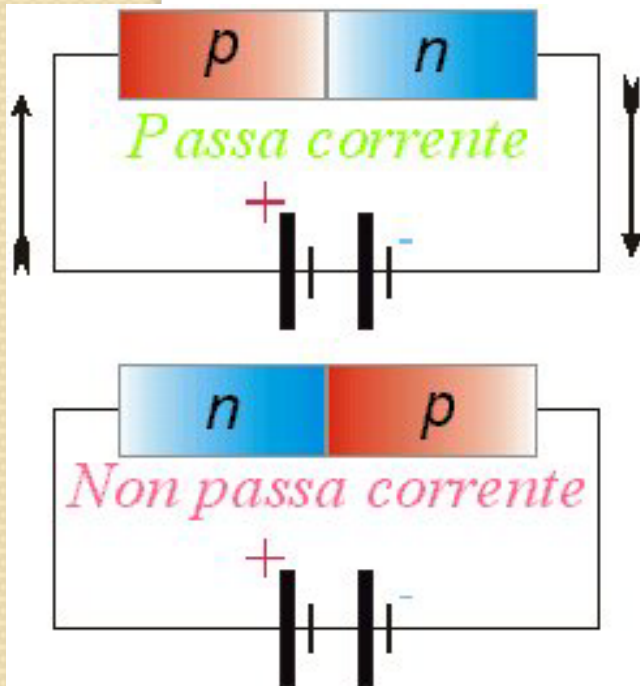


- Un cristallo puro di Silicio può essere “drogato” in due modi: drogaggio di tipo p e drogaggio di tipo n.
- Nell'immagine Silicio (tetravalente) drogato con Boro (trivalente) e Fosforo (pentavalente)

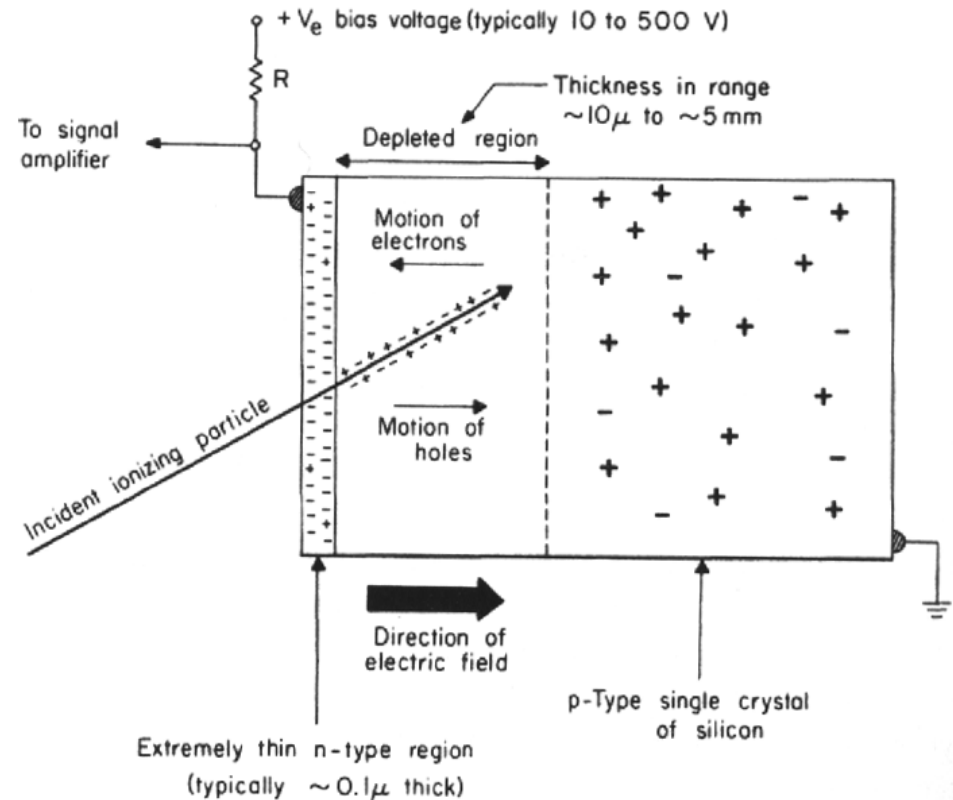
Giunzione PN e zona di svuotamento



Polarizzazione diretta



Polarizzazione inversa



Vantaggi rispetto ai rivelatori a gas

- L'energia necessaria a produrre in media una coppia elettrone-lacuna è di 3,5 eV in silicio e 2,9 in germanio (**10 volte minore che nei gas**).
- Risoluzioni elevate nella misura dell'energia, infatti a parità di energia persa la corrente raccolta è circa 10 volte maggiore di quanto non accada con la camera a ionizzazione.
- Ridotte dimensioni fisiche del rivelatore (**1000 volte più denso**)

Rivelatori passivi

- Tra i rivelatori passivi possiamo elencare:
 - Pellicole fotografiche (ormai in disuso)
 - Rivelatori OSL (optically stimulated luminescence)
 - Cristalli a termoluminescenza
 - Dosimetri chimici

Lastre fotografiche fotografico



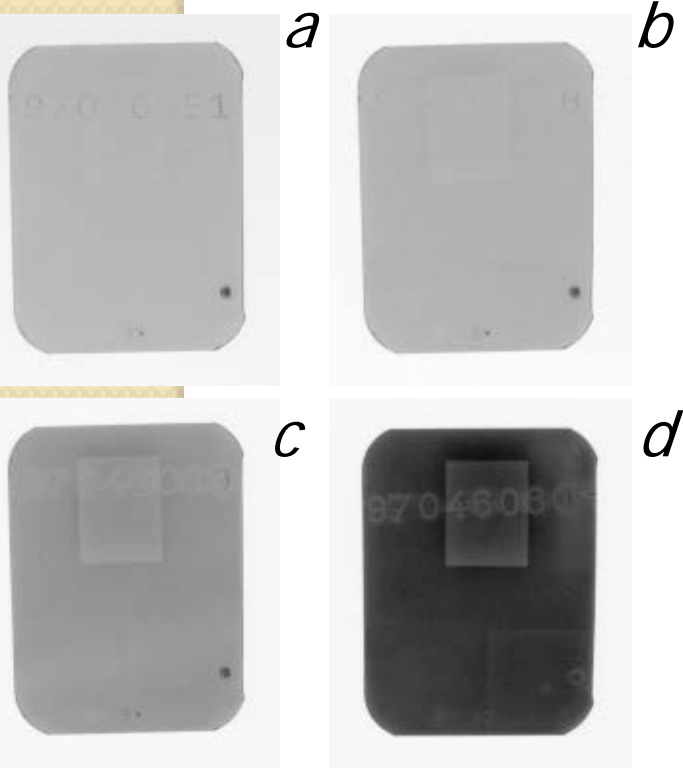
- Le lastre fotografiche sono state il primo tipo di rivelatori di radiazioni ionizzanti utilizzati.
- Sono costituite da un supporto di plastica o vetro con una emulsione con grani di AgBr.
- I grani hanno un diametro di circa $1\ \mu\text{m}$.
- A causa dell'alto numero atomico dell'Ag ($Z=47$) vi è un'alta probabilità di interazione con i γ di alcuni keV che attraversano la lastra.
- L'interazione del fotone con l'emulsione fotografica e la successiva emissione di un elettrone causa la riduzione del AgBr in Ag metallico.
- L'effetto di riduzione dei granuli «vicini» all'evento viene amplificato dallo sviluppo della lastra fotografica

Dosimetro fotografico



- Il dosimetro fotografico è costituito da una pellicola dosimetrica avvolta in un involucro opaco.
- La pellicola così confezionata è racchiusa poi in un contenitore, che fa parte integrante del dosimetro.
- Nel contenitore sono presenti tre filtri in rame (0.03 mm, 0.5 mm, 1.2 mm) e un filtro in piombo (0.8 mm). Si hanno in totale 5 zone con caratteristiche differenti di attenuazione della radiazione.

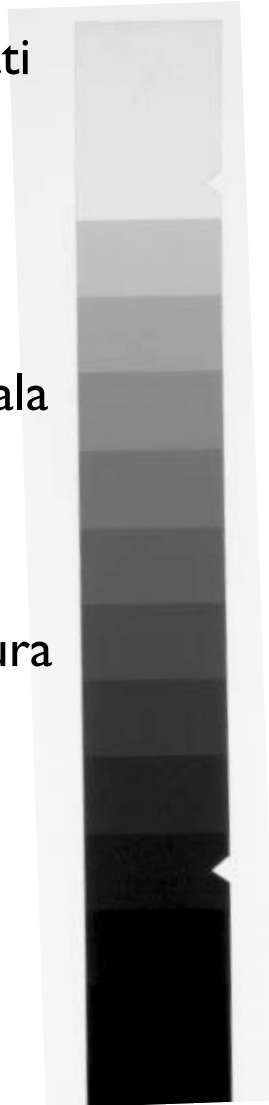
Valutazione della dose



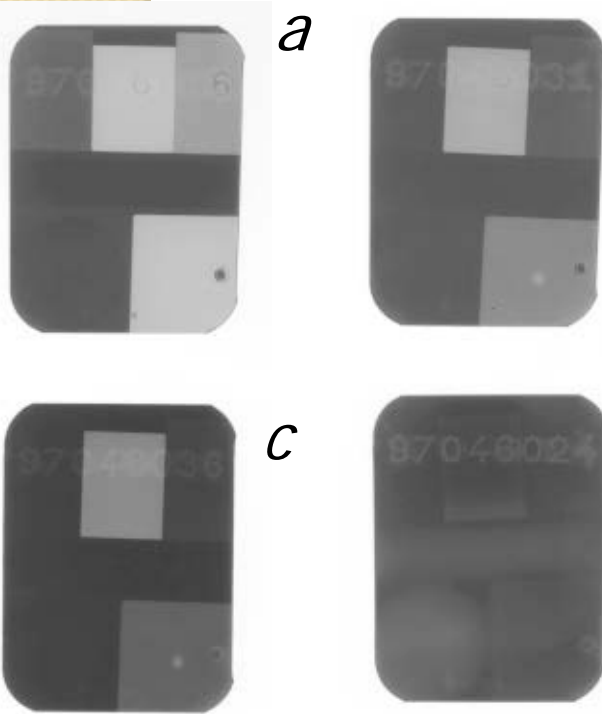
- Il dosimetri a, b, c, d sono stati irraggiati con dosi crescenti, l'annerimento è funzione della dose.
- In prima approssimazione si può confrontare l'annerimento con una scala di grigi tarata.
- Per effettuare una misura precisa si utilizza un Fotodensitometro che misura la Densità Ottica : $D = \text{Log} \frac{I_0}{I}$

I_0 = Intensità luminosa entrante

I = Intensità luminosa uscente



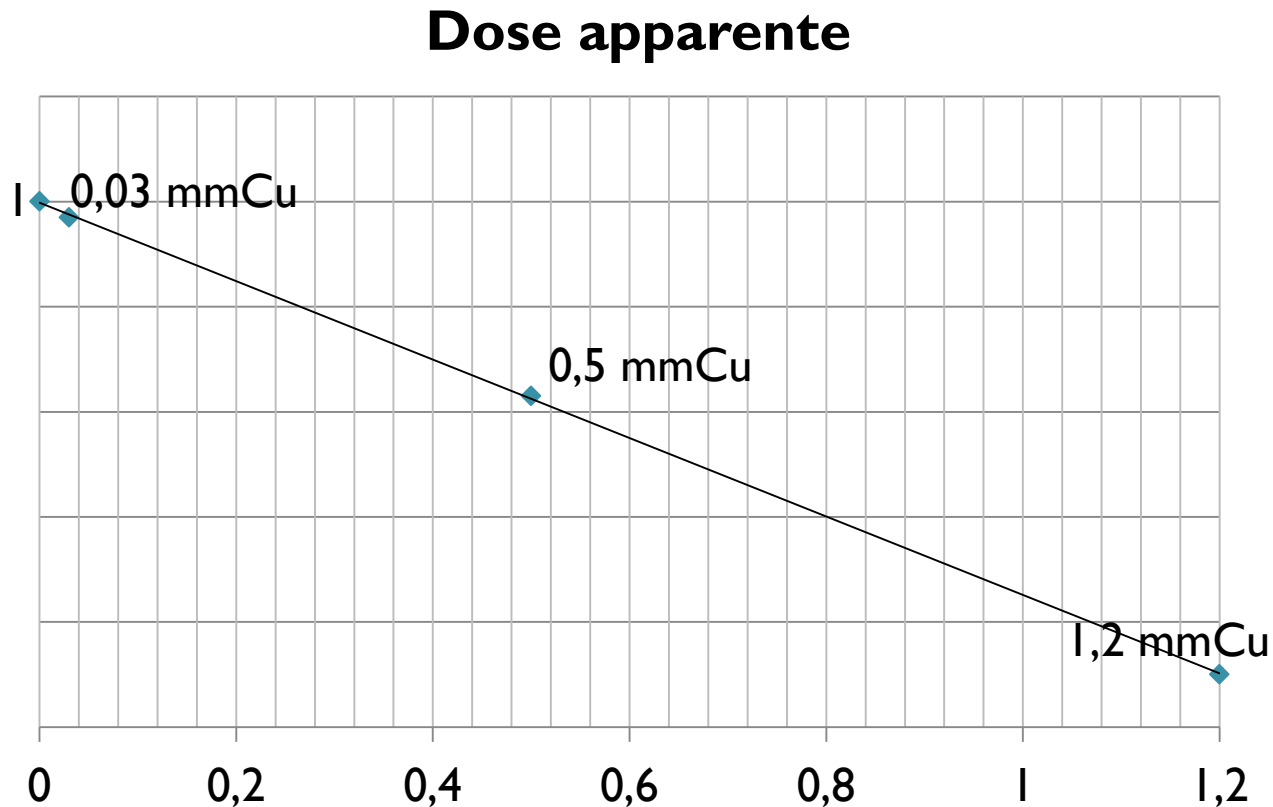
Sensibilità del dosimetro fotografico al variare della energia della radiazione.



- b* • Il dosimetri a, b, c, d sono stati irraggiati con radiazioni di energia via via crescente.
- La variabilità maggiore si ha in corrispondenza del filtro di Cu da 1.2 mm posto in basso a destra di ogni dosimetro.
- d* • Nel dosimetro d esposto a radiazioni di 1250 keV (Co 60) l'annerimento nelle zone sotto i filtri è superiore a quello nella finestra circolare (in basso a sinistra).

- Nel dosimetro irraggiato con radiazioni di alta energia è visibile l'effetto prodotto dai fotoni Compton, che producono una 'sfumatura' nei bordi dei filtri.

Curva caratteristica di una radiazione monoenergetica Dose-Spessore filtri

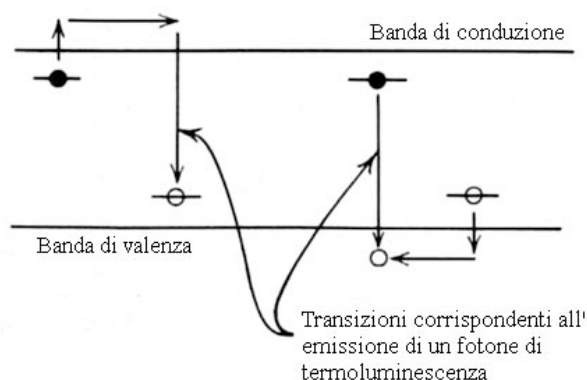
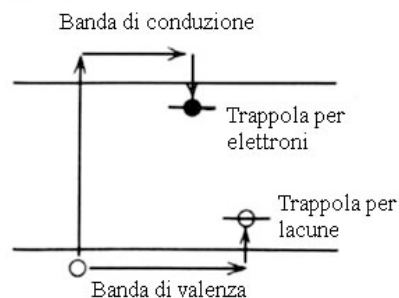


Dosimetri a Termoluminescenza (TLD)

- I materiali termoluminescenti sono in grado di immagazzinare l'energia ceduta dal passaggio della radiazione ionizzante e di riemetterla sotto forma di luce visibile quando riscaldati.
- Tanti sono i materiali che hanno questa caratteristica (es. NaCl).
- La sostanza più comunemente utilizzata nei dosimetri personali è LiF (Fluoruro di Litio).
- Caratteristica importante del cristallo di LiF è che può essere riprodotto molto piccolo ($4 \times 4 \times 0.8 \text{ mm}^3$) e quindi utilizzato dentro anelli oppure fasce per la dosimetria delle mani o del cristallino dell'occhio umano.



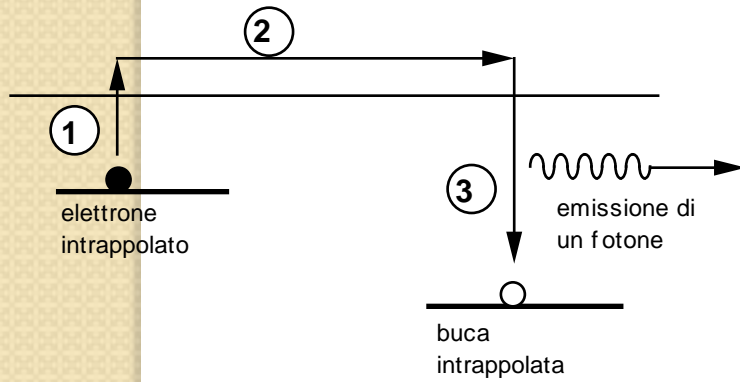
Cristalli termoluminescenti



- I materiali TL (isolanti) opportunamente drogati creano trappole nella banda proibita.
- A seguito della interazione della radiazione ionizzante con il cristallo TL, vengono liberate delle coppie di cariche elettriche (e^- / buche).
- Dopo un breve percorso all'interno del cristallo gli e^- e le buche rimangono intrappolati nei difetti reticolari della struttura cristallina.
- Il numero di coppie prodotte ed intrappolate nel cristallo dipende dalla energia depositata nel cristallo dalla radiazione ionizzante, quindi dipende dalla dose assorbita.
- L'informazione sulla dose assorbita viene conservata fino a quando il cristallo non viene scaldato.

Termoluminescenza e dose

- Riscaldando il cristallo TL si fornisce l'energia necessaria alla ricombinazione delle cariche elettriche intrappolate nei difetti reticolari.
- La ricombinazione delle cariche comporta l'emissione di fotoni luminosi



Per liberare un elettrone da una trappola occorre una certa quantità di energia; questa energia viene fornita all'elettrone intrappolato tramite il riscaldamento del cristallo (**fase 1**).

A questo punto l'elettrone può muoversi all'interno del cristallo (**fase 2**) fino a raggiungere un difetto reticolare in cui è intrappolata una buca, con la quale si ricombina (**fase 3**) emettendo un fotone.

Confronto TLD - dosimetri fotografici

- I cristalli TLD:

- possono essere molto piccoli e molto pratici. ✓
- possono essere riutilizzati molte volte. ✓
- la lettura cancella l'informazione 👎

- I dosimetri fotografici:

- possono essere impiegati una sola volta 👎
- la lettura può essere ripetuta ✓
- il dosimetro può essere conservato per tempi lunghi ✓