

# Rivelatori

# Indice

## ➤ **Caratteristiche generali**

sensibilità, risposta, spettro d'ampiezza, risoluzione energetica, efficienza, tempo morto

## ➤ **Rivelatori a Scintillazione**

proprietà chimico-fisiche degli scintillatori  
guide di luce & fotomoltiplicatori

## ➤ **Risposta di uno Scintillatore ai Fotoni**

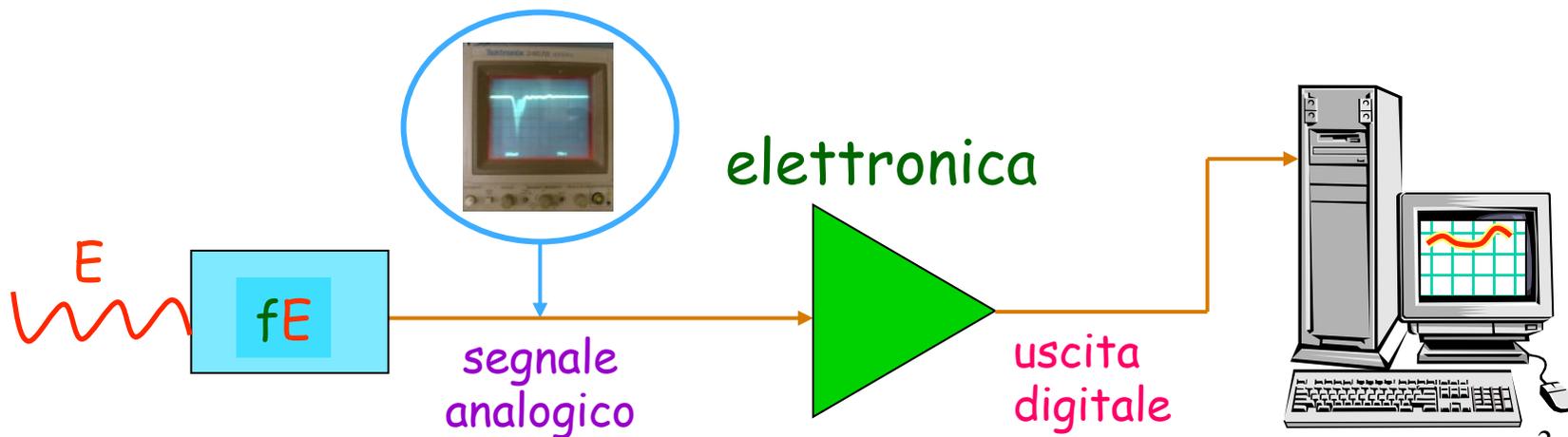
fotopicco, Compton edge, picchi di fuga

# Logica

Principio di funzionamento generale di un rivelatore

particella di **energia**  $E$  → trasferimento di energia  $f E$  ( $f \leq 1$ )  
al rivelatore → conversione in **forma d'energia accessibile**

Rivelatori moderni sono essenzialmente elettrici:  $f E$  convertita in  
**impulsi elettrici** → necessaria **elettronica** per il trattamento dell' info



# Caratteristiche Generali

## A. Sensibilità

capacità di produrre segnale utilizzabile  $S$  per un dato tipo di radiazione di una data energia

(non esiste rivelatore sensibile a tutte le radiazioni di qualunque energia)

Dipende da:

- $\sigma$  delle reazioni ionizzanti, i.e. probabilità di conversione di  $f E$  in forma di ionizzazione
- massa del rivelatore: fissata  $\sigma$ ,  $\rho$  e  $V$  determinano frequenza delle interazioni  $\rightarrow$  massa richiesta dipende dal tipo e dall'energia della radiazione da rivelare

# Caratteristiche Generali

- rumore del rivelatore  $N_R$ : minima ionizzazione in grado di produrre segnale utilizzabile  $S$  è determinata dal rumore del sistema rivelatore  $\oplus$  elettronica  $\rightarrow$  deve essere  $S \gg N_R$
- entrance window: comporta esistenza di una energia minima rivelabile

## B. Risposta

interazione di una particella nel rivelatore  $\rightarrow$  rilascio (quasi istantaneo) di carica elettrica  $Q$  nel volume sensibile del rivelatore  $\rightarrow$  raccolta tramite campo elettrico



$t_c$  = tempo di risposta

1 ps  $\div$  1 ns in funzione  
del tipo di rivelatore

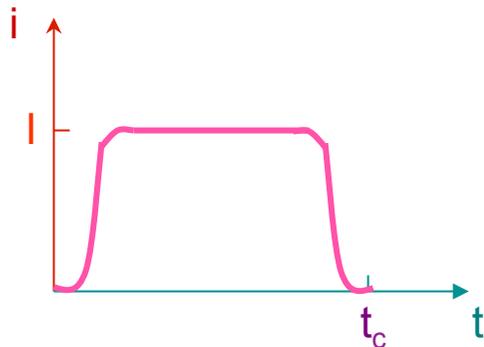
# Caratteristiche Generali

$t_c$  riflette:

- ✓ diversa **mobilità** dei portatori di carica
- ✓ diverso **cammino** percorso per arrivare all' elettrodo di raccolta



risposta del rivelatore: **impulso di corrente**



$$Q = \int_0^{t_c} dt i(t)$$

# Caratteristiche Generali

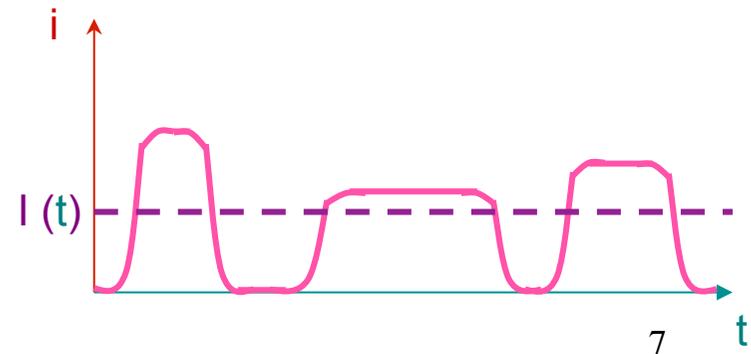
*N.B.* – situazione **reale**: molte particelle che interagiscono nell' unità di tempo



**Alta rate**: corrente deriva da più interazioni  
**Bassa rate**: impulsi di corrente distinti

2 modi d' operazione distinti per i rivelatori:

- i. **corrente**: misura della corrente continua **media** prodotta dal rivelatore → dosimetria



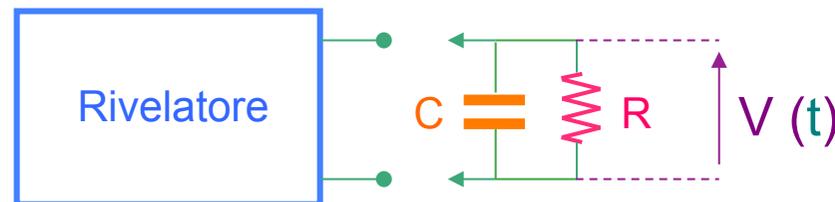
# Caratteristiche Generali

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t dt' i(t')$$

$T$  = tempo di risposta del  
circuitto di misura

$T \sim 1 \text{ s} \rightarrow$  misuro corrente media  $I \sim \bar{r} \bar{Q}$  ← carica media per  
interazione  
↑  
rate media

ii. **impulso**: registrazione di singolo impulso dal rivelatore



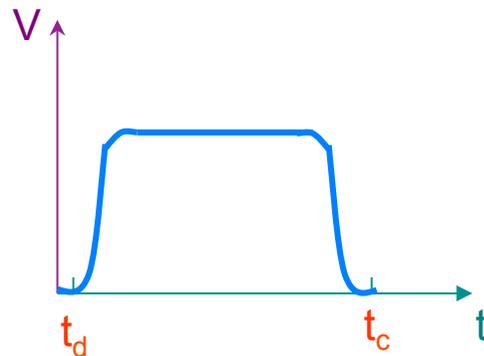
$\tau = R C$   
(costante di tempo)

# Caratteristiche Generali

*N.B.* – R e C tengono conto sia del rivelatore che del circuito di misura esterno

2 regimi diversi sono possibili:

- $\tau \ll t_c \rightarrow$  corrente che scorre in R = al valore istantaneo della corrente prodotta dal rivelatore  $\rightarrow$  timing



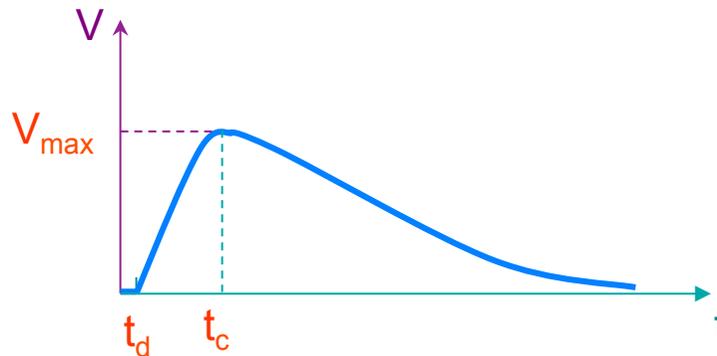
$$V(t) = R i(t)$$

# Caratteristiche Generali

- $\tau \gg t_c \rightarrow$  poca corrente fluisce in  $R$  durante la raccolta  $\rightarrow$  corrente prodotta dal rivelatore è integrata da  $C$



se l'intervallo di tempo tra eventi successivi è sufficientemente grande  $C$  si scarica attraverso  $R \rightarrow$  tensione su  $R$  ritorna a zero



$$V_{\max} = \frac{Q}{C}$$

# Caratteristiche Generali

Caratteristiche del segnale d' uscita:

- ❖ tempo di salita =  $t_c$  (rivelatore)
- ❖ tempo di salita =  $\tau$  (circuito)
- ❖  $C = \text{costante} \rightarrow V_{\max} \propto Q \propto \text{energia rilasciata}$

*N.B.* – regime impulsivo è più conveniente:

- sensibilità più elevata (registro ogni singolo impulso)
- ampiezza impulso contiene info più importanti ai fini delle applicazioni (quando  $\tau \gg t_c$ )

nel regime corrente  
queste info sono perdute



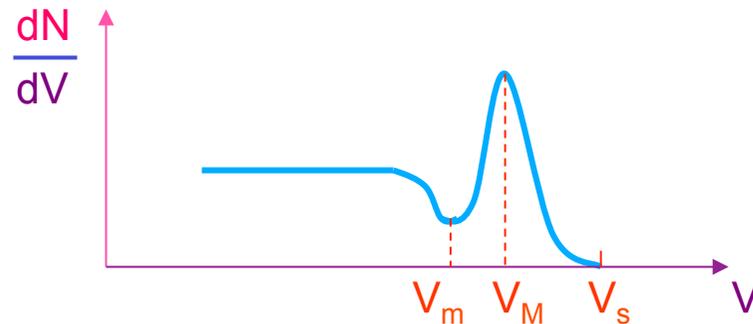
modo d' operazione più  
comune: impulso  $\oplus \tau \gg t_c$

# Caratteristiche Generali

## C. Spettro d' Ampiezza

2 tipi distinti di spettri:

i. differenziale  $\frac{dN}{dV}$  vs  $V$



*N.B.* –  $V > V_s \rightarrow \frac{dN}{dV} = 0$

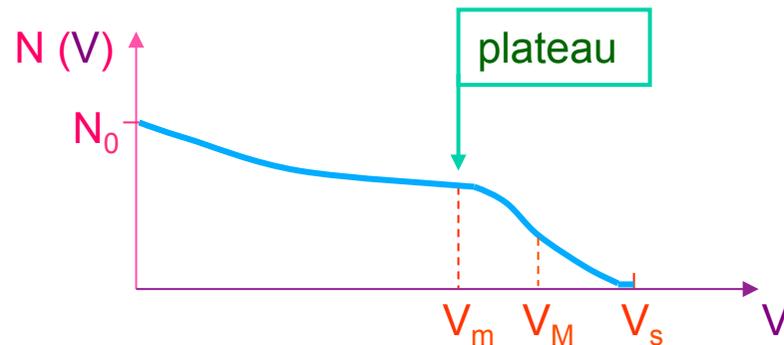
$V$  = ampiezza dell' impulso  
 $dN$  = n. impulsi di ampiezza  
 $\in [V, V + dV]$

n. totale impulsi:

$$N_0 = \int_0^{\infty} dV \frac{dN}{dV}$$

# Caratteristiche Generali

i. integrale  $N$  vs  $V$



$N = n.$  impulsi di ampiezza  $\geq V$

$$N(V) = \int_V^{V_s} dV' \frac{dN}{dV'}$$

*N.B.* –  $N(V)$  sempre **monotona decrescente**

- **plateau** è punto di lavoro conveniente: **max. stabilità** su tempi lunghi  $\rightarrow$  piccole variazioni del livello degli impulsi hanno minima incidenza sul n. di impulsi registrati  $\rightarrow$  funzionamento del rivelatore come **contatore**

# Caratteristiche Generali

Spettri  
d'ampiezza



Funzione di risposta  
del rivelatore

Spettro osservato dipende da:

- interazioni subite dalla radiazione (dipendenti da tipo ed energia della radiazione incidente)
- tipo e geometria del rivelatore

$$\frac{dN}{dV} = \int dE S(E) R(V,E)$$

risposta del  
rivelatore

spettro in energia della  
radiazione incidente

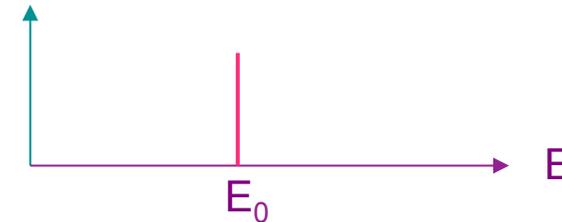
# Caratteristiche Generali

## D. Risoluzione Energetica

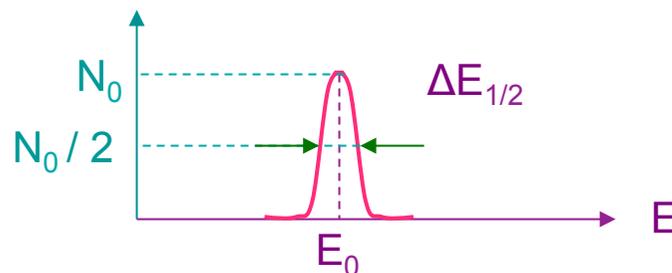
capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

Misura: fascio monocromatico ( $E_0$ ) di particelle che incide sul rivelatore → osservazione dello spettro d'ampiezza risultante:

- Caso ideale:  $\delta$  di Dirac



- Caso reale: fluttuazioni nel n. di ionizzazioni → gaussiana



$$R = \frac{\Delta E_{1/2}}{E_0} \quad (\text{FWHM})$$

# Caratteristiche Generali

$\epsilon$  = energia media richiesta per una ionizzazione: funzione solo del tipo di materiale di cui è realizzato il rivelatore  $\rightarrow$  particella che deposita energia  $E$  compie, in media,  $J = E / \epsilon$  ionizzazioni !!

Natura poissoniana del processo di ionizzazione  $\rightarrow$  fluttuazione nel n. di ionizzazioni =  $J^{1/2}$



$$R \propto J^{1/2} / J = J^{-1/2}$$



$$R \propto E^{-1/2}$$

risoluzione energetica migliora al crescere dell' energia della radiazione da rivelare

# Caratteristiche Generali

Ulteriori sorgenti di fluttuazione:

- rumore associato all'elettronica
- deriva delle caratteristiche del sistema

Ipotesi : fluttuazioni indipendenti

$$\longrightarrow (\Delta E_{1/2}^{\text{tot.}})^2 = (\Delta E_{1/2}^{\text{stat.}})^2 + (\Delta E_{1/2}^{\text{elet.}})^2 + (\Delta E_{1/2}^{\text{der.}})^2 + \dots$$

Esempio: fotoni da 1 MeV

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NaI : } R \sim 8 \% \\ \text{GeLi : } R \sim 0.1 \% \end{array} \right.$$

# Caratteristiche Generali

## E. Efficienza

2 tipi d'efficienza:

i. assoluta

$$\epsilon_T = \frac{N_R}{N_S}$$

n. impulsi rivelati

n. particelle emesse  
dalla sorgente

funzione di:

- geometria del rivelatore
- probabilità d'interazione nel rivelatore

# Caratteristiche Generali

ii. intrinseca  $\epsilon_i = \frac{N_R}{N_i}$  ← n. particelle incidenti sul rivelatore

funzione solo probabilità d' interazione nel rivelatore, i.e. dipende da:

- tipo & energia della radiazione
- materiale di cui è composto il rivelatore

*N.B.* –  $\epsilon_T \rightarrow \epsilon_i$  elimina dipendenza geometrica: permane debole dipendenza dalla distanza sorgente - rivelatore

emissione isotropa  $\longrightarrow \epsilon_T = \epsilon_i \Delta\Omega / 4\pi$

# Caratteristiche Generali

## F. Tempo morto

minimo intervallo di tempo che deve intercorrere tra 2 eventi affinché possano essere considerati distinti

durante tale tempo  $\tau$  il rivelatore può essere:

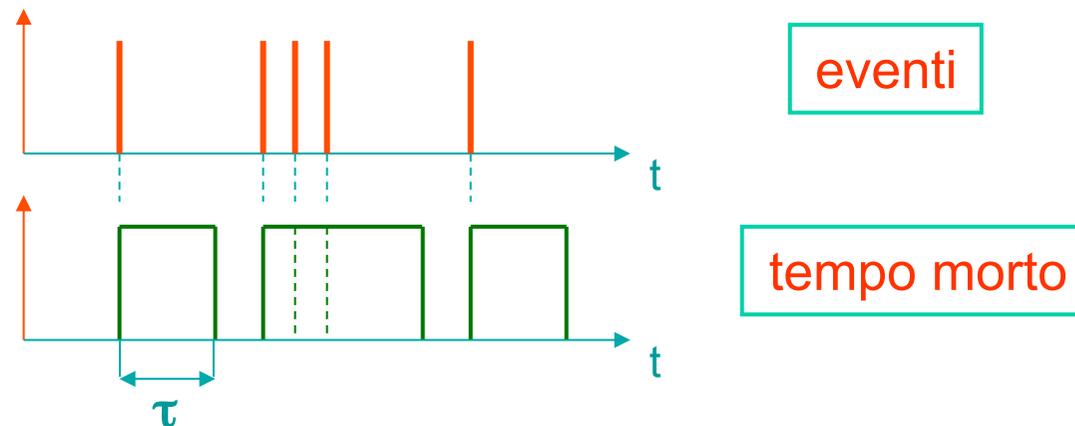
- ✓ **insensibile**: qualunque evento che arriva entro  $\tau$  è **perduto**
- ✓ **sensibile**: sovrapposizione di eventi → **pile-up**: distorsione del segnale → **perdo info su entrambi**

$\tau$  è determinato da ogni elemento del sistema di rivelazione, in particolare dall' **elettronica** di processamento del segnale

# Caratteristiche Generali

Ipotesi:  $\tau$  è lo stesso per tutti gli eventi  $\rightarrow$  2 modelli possibili:

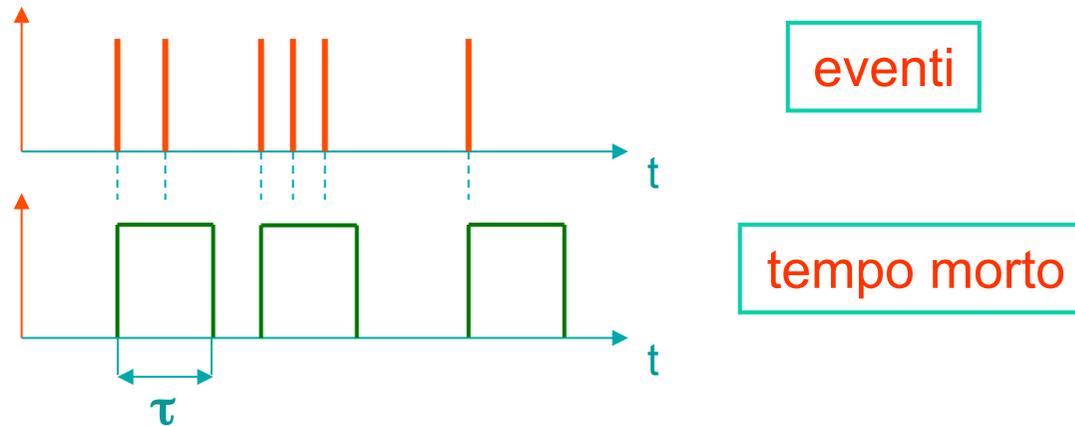
- i. **estendibile**: arrivo di un segnale durante un periodo di tempo morto estende tale periodo aggiungendo il suo  $\tau$  a partire dall'istante d'arrivo



solo eventi separati da intervallo di tempo  $> \tau$  sono accettati

# Caratteristiche Generali

- i. **non-estendibile**: arrivo di un secondo segnale durante  $\tau$  non è registrato



*N.B.* – i 2 modelli **coincidono** quando è soddisfatta la condizione  $m \tau \ll 1$  ( $m$  è la rate di emissione della sorgente)

# Caratteristiche Generali

Problema: a quale categoria appartiene un dato sistema di rivelazione ??

Alcune parti del sistema sono descrivibili con il modello **e**; altre con quello **n-e**. Inoltre, il tempo morto può dipendere dalla forma dell' impulso, dalla rate, ...



Soluzione

aggiunta di un circuito di blocco (**inhibit**), i.e. circuito il cui tempo morto è maggiore di quello dei vari elementi del sistema: rallento il sistema complessivo ma risolvo l' ambiguità **e vs. n-e !!**

# Rivelatori a Scintillazione

Passaggio di radiazione attraverso materiale scintillante → eccitazione di atomi e molecole del materiale → emissione di luce → raccolta e trasmessa (direttamente o via una guida di luce) ad un fotomoltiplicatore (PMT) → convertita in una corrente elettrica → analizzata da un sistema elettronico

Caratteristiche salienti di questi rivelatori:

## a) Sensibilità all' Energia

al disopra di una certa energia minima, comportamento lineare dello scintillatore rispetto all' energia depositata, i.e. quantità di luce emessa  $\propto$  all' energia  $E$  che l' ha prodotta. PMT lineare → ampiezza del segnale elettrico di uscita  $\propto E$  → strumento adatto per fare spettrometria

# Rivelatori a Scintillazione

## b) Risposta veloce

tempi di risposta e recupero sono brevi rispetto a quelli tipici di altri rivelatori → strumento adatto per ottenere info temporali (timing); alta velocità di risposta → piccolo tempo morto → sopporta alta rate

## c) Discriminazione di forma

in certi scintillatori particelle di diversa natura producono impulsi di luce di forma diversa: eccitazione di meccanismi di fluorescenza diversi per particelle di differente potere ionizzante

# Scintillatori

Materiali che esibiscono la proprietà della **luminescenza**:  
quando esposti a certe forme d'energia (radiazione, calore, ...) **assorbono e riemettono energia in forma di luce visibile**

- riemissione immediata (entro 10 ns) → **fluorescenza**
- riemissione ritardata (~ μs ÷ ~ ora) → **fosforescenza**

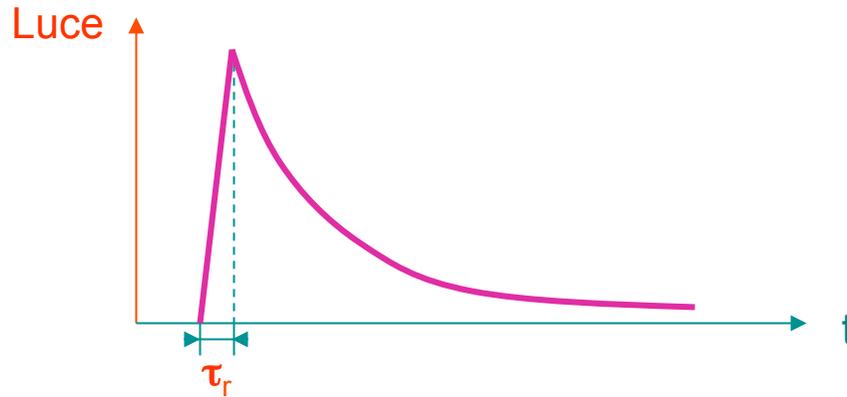
Andamento temporale del processo di **riemissione**:

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

n. totale di fotoni emessi

costante di decadimento

# Scintillatori



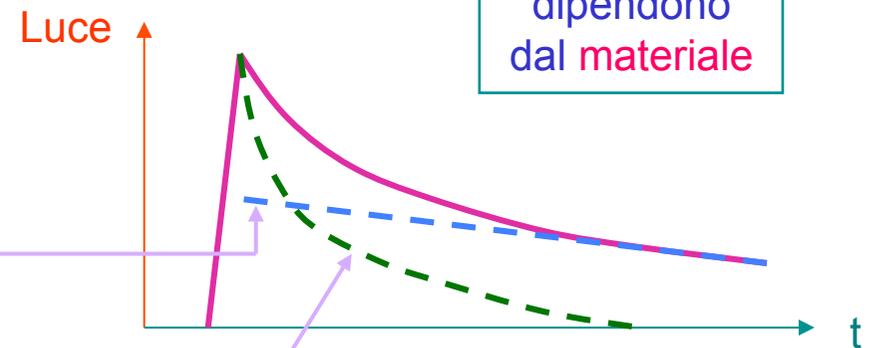
*N.B.* – tempo di salita  $\tau_r \ll \tau_d$

In molti casi il comportamento è più complesso:

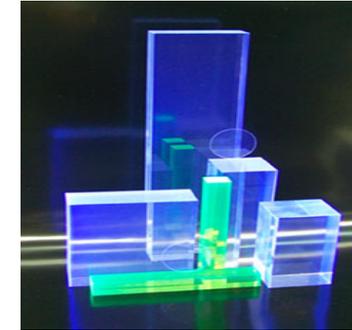
$$N(t) = A e^{-t/\tau_f} + B e^{-t/\tau_s}$$

fast

slow



# Scintillatori



Requisiti di un **buono** scintillatore:

- ✓ alta efficienza per la conversione **Energia** → **Luce**
- ✓ **trasparenza** alla sua luce di fluorescenza
- ✓ emissione luminosa in **regione di frequenza sovrapposta** a quella di sensibilità del **PMT**
- ✓ **piccolo**  $\tau_d$

Tipi di scintillatori:

- ❖ cristalli organici ( $C_{14}H_{10}$ ,  $C_{14}H_{12}$ ,  $C_{10}H_8$ )
- ❖ liquidi e plastici organici ( $C_{18}H_{14}$ ,  $C_{24}H_{16}N_2O_2$ )
- ❖ cristalli inorganici (NaI, CsI, BGO,  $BaF_2$ )
- ❖ miscele gassose (90%  $^3He$  + 10% Xe)
- ❖ vetri (silicati di Li e B)

# Scintillatori Organici

composti di idrocarburi aromatici contenenti strutture ad anello benzenico condensate

Caratteristica essenziale: piccolo  $\tau_d$  (< qualche ns)

Meccanismo di scintillazione: eccitazione di livelli molecolari in un materiale fluorescente primario che diseccitandosi emette luce UV.

Luce UV è facilmente assorbita nella maggior parte dei materiali organici → aggiunta di secondo materiale fluorescente in cui questa luce è convertita in luce visibile: wavelength shifter, i.e. materiale con spettro di assorbimento compatibile con quello di emissione del primario e spettro di emissione adattato alla risposta spettrale del PMT

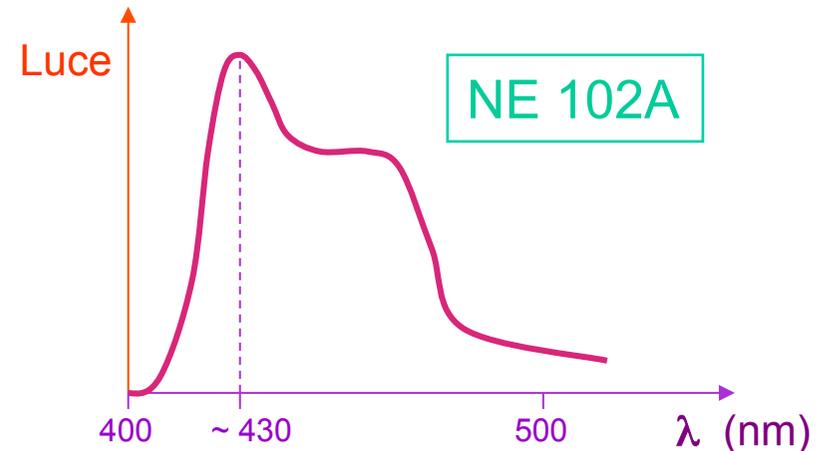
# Scintillatori Organici

Particolarmente usati sono i **plastici**:

- $\tau_d = 2 \div 3$  ns
- grande quantità di luce

- Inoltre:
- facilmente sagomabili (film sottili, fogli, blocchi, cilindri)
  - resistenti all'acqua pura e a colle al silicio
  - basso costo

*N.B.* – basso  $Z$  → adatti per rivelazione di  $e^-$



**Svantaggi:** facilmente attaccati da solventi organici (**acetone**)

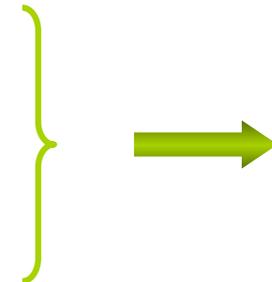
# Scintillatori Inorganici

cristalli ionici dopati con centri attivatori (centri di colore)



Particella ionizzante → produzione di:

- elettroni liberi (●)
- lacune libere (○)
- coppie elettrone-lacuna = eccitoni (○--●)



# Scintillatori Inorganici

portatori di carica in moto attraverso il reticolo fino a che incontrano centro attivatore A → trasformazione in **centro attivatore eccitato** A\* che in seguito si ritrasforma in A con **emissione di luce**

tempo di decadimento della **luce di scintillazione** è dato da quello della transizione A\* → A e dipende dalla **temperatura** secondo la legge:

The diagram illustrates the components of the Boltzmann factor in the decay law. A box on the left contains the text "energia d' eccitazione del livello A\*", with an arrow pointing to the numerator  $E_c$  of the fraction in the exponent. A box on the right contains the text "costante di Boltzman", with an arrow pointing to the denominator  $k_B T$  of the fraction. The full expression is  $\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$ .

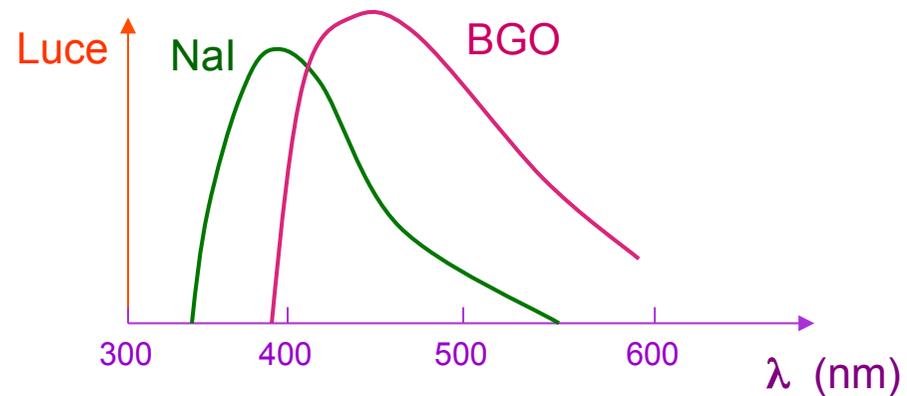
$$\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$$

Luce » di quella emessa negli scintillatori organici → < fluttuazioni statistiche nel n. di fotoni emessi → **migliore risoluzione energetica**

# Scintillatori Inorganici

Uso più frequente come rivelatore di raggi  $X$ ,  $\gamma$  e  $e^\pm$  di alta energia

Risposta di luce:



Risposta **più lenta** di quella degli organici (NaI:  $\tau_d = 250$  ns)

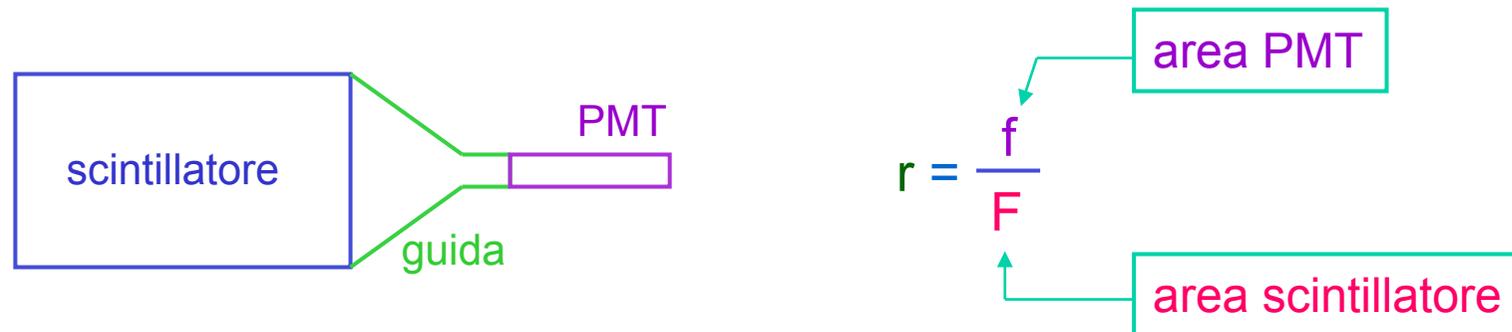
**Svantaggio:** igroscopicità → necessità di contenitore protettivo

Scintillatore inorganico più utilizzato: NaI dopato con Tallio (Tl)

# Guida di Luce

Sistema di trasporto della luce di scintillazione verso il PMT

Materiale plastico (plexiglass) opportunamente sagomato in modo da adattare la superficie di uscita dello scintillatore con quella d'ingresso del PMT → solo una frazione  $r$  della luce prodotta raggiunge il PMT



**aumento** di  $r$  per mezzo di geometrie più complicate (**twisted**): strisce separate di plexiglass attaccate all'estremità dello scintillatore e attorcigliate in modo da convergere nel PMT

# Fotomoltiplicatore

Tubo elettronico che converte la luce in corrente elettrica misurabile

Struttura di schematica di un PMT

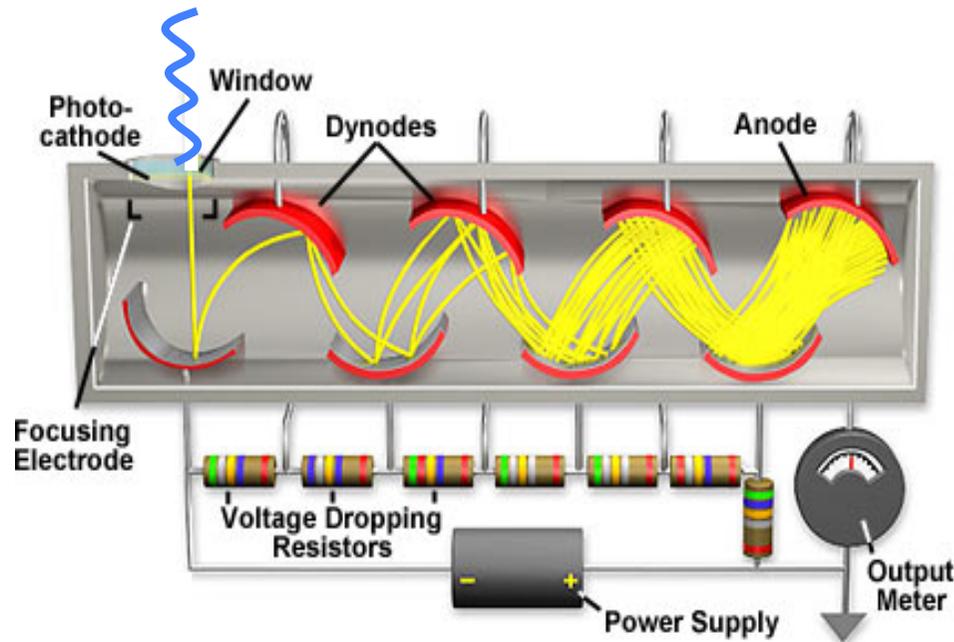
all' interno di un tubo di vetro sottovuoto si hanno:

- a) catodo di materiale fotosensibile (converte fotoni in elettroni)
- b) sistema di raccolta degli elettroni
- c) moltiplicatore di elettroni (sistema di dinodi)
- d) anodo di raccolta per la produzione del segnale finale

tensione (HV) è applicata al sistema catodo - dinodi - anodo tramite un partitore in modo da avere una d.d.p. a scala lungo la struttura

# Fotomoltiplicatore

Fotone visibile colpisce **catodo** → **emissione**, per effetto fotoelettrico, di  $e^-$  che, causa la tensione applicata, è **accelerato** ed indirizzato **b)** verso il 1<sup>^</sup> dinodo → **emissione di  $e^-$  secondari** che sono **accelerati** ed indirizzati verso dinodo successivo → **formazione di cascata di  $e^-$**  attraverso i dinodi **c)** → **raccolta della cascata all' anodo d)**



tragitto **catodo – anodo**  
richiede circa **40 ns**

tempo di salita  
dell' impulso di corrente  
circa **2 ns**

# Fotomoltiplicatore

a) **Catodo:** parametro fondamentale è l' **efficienza quantica**

$$\eta(\lambda) = \frac{N_{\text{ph.e.}}}{N_{\text{ph.i.}}(\lambda)}$$

← n. fotoelettroni emessi

← n. fotoni incidenti

Materiale più usato: **Sb-Rb-Cs** →  $\lambda_M = 420 \text{ nm}$ ;  $\eta(\lambda_M) \cong 30 \%$

b) **Sistema di raccolta d' ingresso:** 2 requisiti essenziali

- raccolta efficiente, i.e. maggior n. di **e<sup>-</sup>** prodotti deve raggiungere il **1<sup>^</sup> dinodo**, ovunque siano generati sul catodo
- tempo impiegato dagli **e<sup>-</sup>** per giungere sul **1<sup>^</sup> dinodo** deve essere indipendente da p.to di generazione sul catodo: **influisce sulla risoluzione temporale del rivelatore**

# Fotomoltiplicatore



particolari configurazioni di campo elettrico  
(quasi mai campi magnetici)

- c) Sistema di moltiplicazione: emissione di  $e^-$  molto simile all'effetto fotoelettrico: fotone è sostituito da  $e^-$  → guadagno di singolo dinodo =  $\delta$  → guadagno totale con  $n$  dinodi =  $\delta^n$

Requisiti:

- alto  $\delta$  (2 ÷ 3)
- stabilità dell'emissione
- ~~secondaria~~ bassa emissione termoionica → basso rumore

Materiale: terra alcalina (per l'emissione secondaria) deposta su conduttore (campo elettrico per accelerare  $e^-$ ) → lega Cu-Be

# Fotomoltiplicatore

**Partitore:** catena di resistenze dimensionate in modo da fornire una fissata d.d.p. tra i vari **dinodi**

Situazione da evitare assolutamente: grosse variazioni di potenziale tra i dinodi dovute alla variazione di corrente nel tubo, i.e. variazioni nel **guadagno totale** e nella **linearità** del PMT

Corrente che scorre nel partitore = **bleeder current**  $I_b$


$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\langle I_{\text{anodo}} \rangle}{I_b}$$

Esempio:  $I_b \sim 100 \langle I_{\text{anodo}} \rangle \Rightarrow \Delta G / G \sim 1 \%$

# Fotomoltiplicatore

Operazione in **regime pulsato** → correnti di picco »  $I_b$  soprattutto negli stadi finali del partitore → cadute di potenziali transienti



## Soluzioni

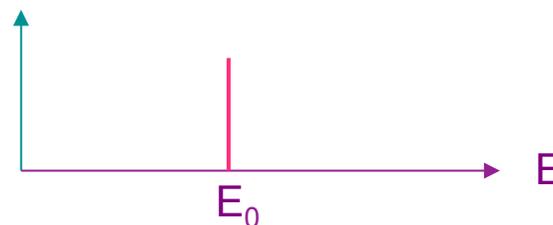
1. **Condensatori di disaccoppiamento negli stadi finali:** forniscono carica durante i picchi di corrente e si ricaricano durante i periodi di assenza di picco
2. **Diodi Zener:** forniscono tensione costante per correnti maggiori di una certa corrente minima di soglia
3. Ad **alta corrente**, ulteriore **HV** esterna

# Risposta ai Fotoni

Fotone che rilascia energia in uno scintillatore → effetto fotoelettrico, effetto Compton, creazione di coppie  $e^\pm$  → generazione di  $e^-$  ( $e^+$ ) secondari che cedono energia al materiale tramite processi di eccitazione/ionizzazione → importanza delle dimensioni del rivelatore

- i. Scintillatore  $\infty$  : energia  $E_0$  del fotone totalmente assorbita e se la risoluzione energetica fosse  $\infty$  ( $\Delta E = 0$ ) la risposta sarebbe del tipo  $\delta$  di Dirac

tutti i fotoni depositano tutta la loro energia all'interno del rivelatore



- ii. Scintillatore finito : risposta più complicata → assorbimento deve essere analizzato in termini delle singole componenti

# Risposta ai Fotoni

Assorbimento Fotoelettrico



$e^-$  + raggi X

$e^-$

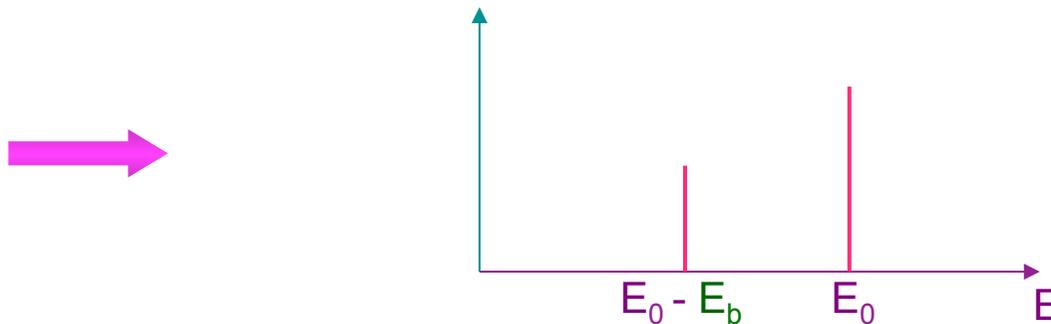
assorbito nel rivelatore

raggi X

2 casi possibili:

- A. sono assorbiti e/o producono altri  $e^-$  → assorbimento completo → fotopicco a  $E_0$
- B. non interagiscono e sfuggono dallo scintillatore → energia depositata  $< E_0$  → picco di fuga a  $E_0 - E_b$

# Risposta ai Fotoni



*N.B.* - causa **risoluzione finita** il picco di fuga è visibile in **NaI(Tl)** solo per  $E_0 < 100$  keV

- altezza relativa dei 2 picchi è sensibilmente influenzata dal **punto**, all'interno dello scintillatore, **in cui avviene l'interazione** → dipende dalle **dimensioni del rivelatore** e dall'angolo di incidenza del fotone su questo

# Risposta ai Fotoni

Assorbimento Compton



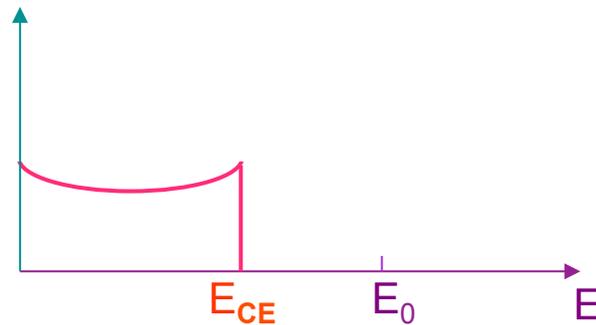
$e^- + \gamma$

$e^-$

spettro continuo da  $E = 0 \rightarrow$

$$E_{CE} = \frac{E_0}{1 + \frac{1}{2\varepsilon}}$$

Compton edge

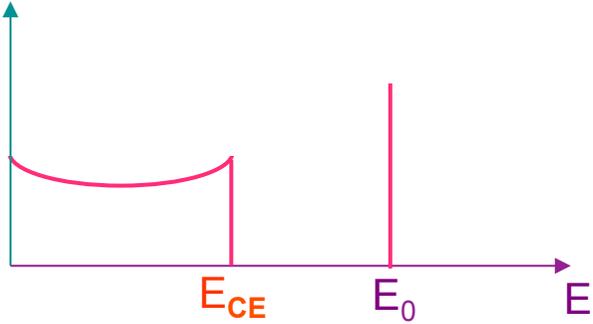


# Risposta ai Fotoni

$\gamma$

3 casi possibili:

- A. assorbito per effetto fotoelettrico
  - B. assorbito per successivi Compton e effetti fotoelettrici
  - C. fuga dal rivelatore
- }  $\longrightarrow$  fotopico
- $\longrightarrow$  spettro continuo in  $[0, E_{CE}]$

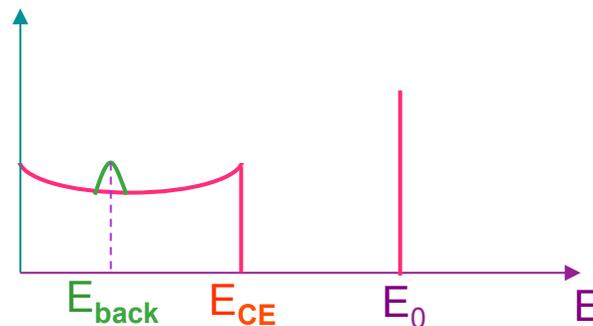


# Risposta ai Fotoni

*N.B.* – **fotoni** della sorgente che subiscono diffusione Compton sul materiale circostante il rivelatore (e.g. l' involucro): se tale diffusione avviene ad angolo  $\theta = \pi$  e il **fotone diffuso rientra nel volume sensibile** la sua energia è

$$E_b = \frac{E_0}{1 + 2 \varepsilon} < E_{CE}$$

se tale fotone viene **assorbito completamente** nel rivelatore si ha un **backscattered peak** a  $E = E_{back}$



# Risposta ai Fotoni

Assorbimento per  
creazione di coppie  $e^\pm$



$e^- + e^+$

$e^-$

assorbito nel rivelatore

$e^+$

dissipa tutta l'energia e, giunto a riposo, si  
annichila con un  $e^-$  del mezzo, i.e.



ciascun fotone possiede una energia di 511 keV

# Risposta ai Fotoni

$\gamma\gamma$

3 casi possibili:

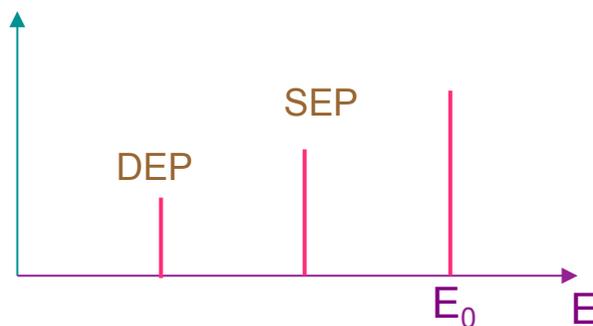
A. assorbiti (fotoelettrico e/o Compton)  $\longrightarrow$  fotopico

B. uno assorbito, l'altro fugge  $\longrightarrow$  picco a  $E_0 - m_e c^2$

SEP

C. fuggono entrambi  $\longrightarrow$  picco a  $E_0 - 2 m_e c^2$

DEP



# Bibliografia

W. R. Leo – *Techniques for Nuclear and Particle Physics  
Experiment* Springer 1987

G. F. Knoll – *Techniques for Nuclear and Particle Physics  
Experiment* (3<sup>rd</sup> Edition) John Wiley & Son 2000