

Rivelatori

Caratteristiche generale e concetti preliminari

Indice

➤ **Caratteristiche generali**

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

➤ **Rivelatori a Scintillazione**

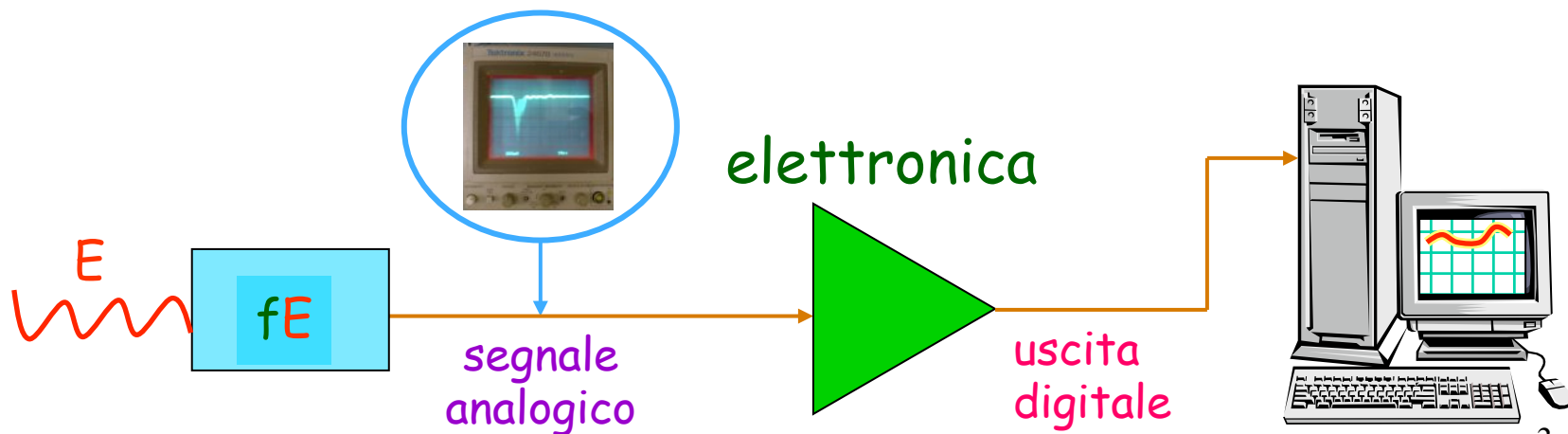
proprietà chimico-fisiche degli scintillatori
guide di luce & fotomoltiplicatori

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:

- σ delle reazioni ionizzanti, i.e. probabilità di conversione di $f E$ in forma di ionizzazione
- massa del rivelatore: fissata σ , ρ 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

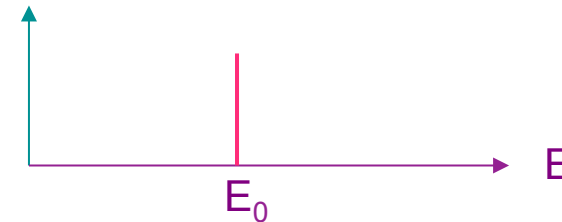
1 ps \div 1 ns in funzione
del tipo di rivelatore

Caratteristiche Generali

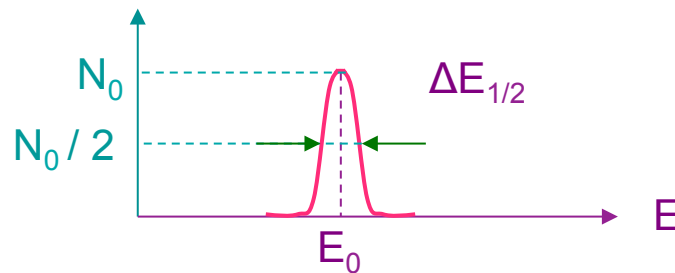
- C. Risoluzione Energetica** capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

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

- Caso ideale: δ di Dirac



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



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

Caratteristiche Generali

ϵ = 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

D. 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 $\longrightarrow \epsilon_T = \epsilon_i \Delta\Omega / 4\pi$

Concetti preliminari

1. Grandezze fondamentali

Energia E [eV] – energia acquisita da un elettrone sottoposto alla d.d.p. di 1 Volt

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \quad \text{Multipli: keV, MeV, GeV, TeV, ...}$$

Massa a riposo m [eV/c²] – misurata tramite $E = mc^2$

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

Impulso p [eV/c] – misurata tramite $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

$$1 \text{ eV}/c = 0.535 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$



Scintillatori

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**

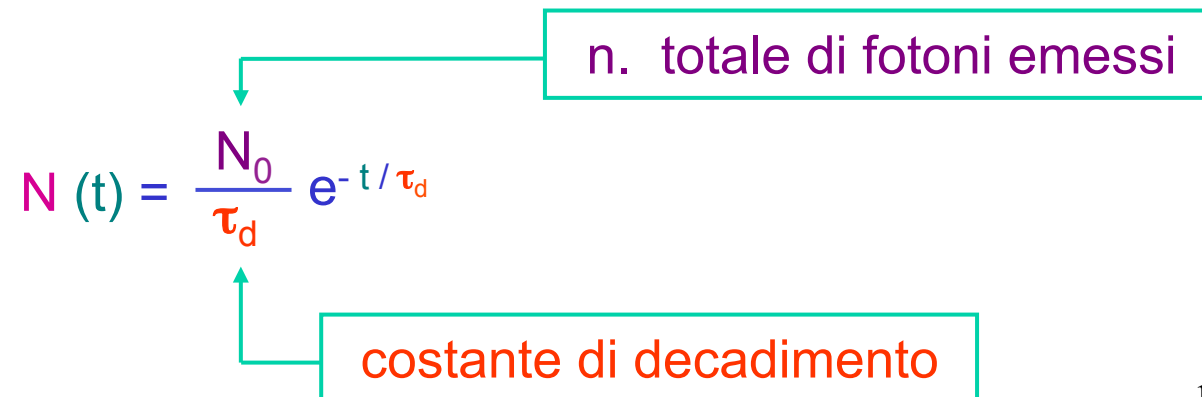
- riemissione immediata (entro 10 ns) → **fluorescenza**
- riemissione ritardata (~ μs ÷ ~ ora) → **fosforescenza**

Andamento temporale del processo di **riemissione**:

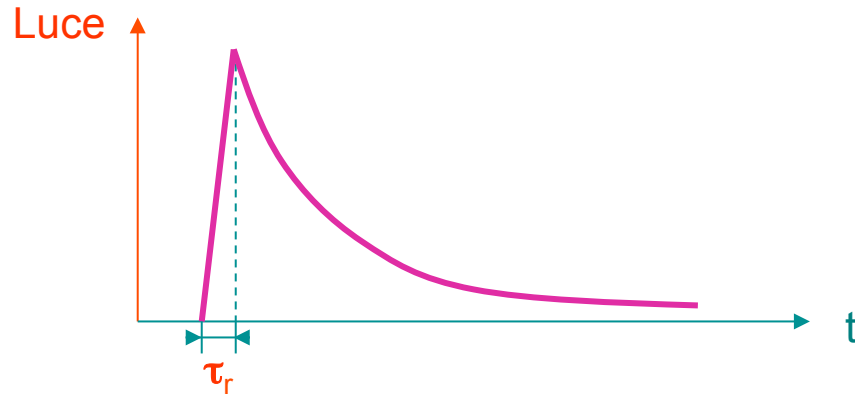
$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}$$

n. totale di fotoni emessi

costante di decadimento



Scintillatori



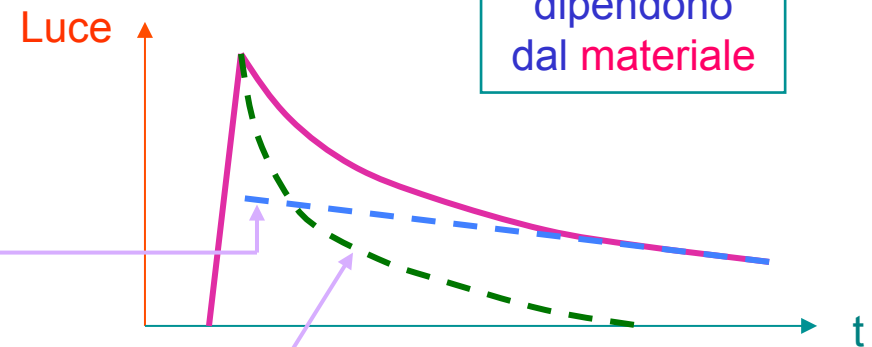
N.B. – tempo di salita $\tau_r \ll \tau_d$

In molti casi il comportamento è più complesso:

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

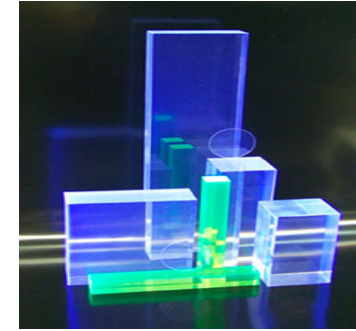
fast

slow



N.B. – A e B
dipendono
dal materiale

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 τ_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)

Fotomoltiplicatore

principio di funzionamento e accoppiamento

Fotomoltiplicatore

Tubo elettronico che converte la luce in corrente elettrica misurabile

Struttura di schematica di un PMT

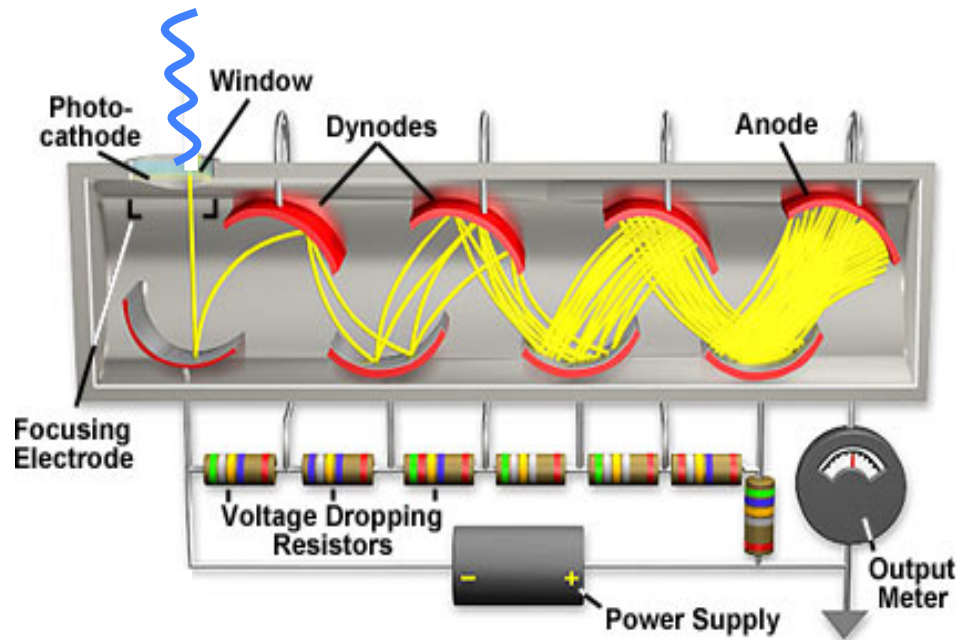
all' interno di un tubo di vetro sottovuoto si hanno:

- 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^o 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**

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

Diagram illustrating the quantum efficiency formula $\eta(\lambda) = \frac{N_{\text{ph.e.}}}{N_{\text{ph.i.}}(\lambda)}$. The numerator $N_{\text{ph.e.}}$ is labeled "n. fotoelettroni emessi" (number of photoelectrons emitted). The denominator $N_{\text{ph.i.}}(\lambda)$ is labeled "n. fotoni incidenti" (number of incident photons).

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

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

- raccolta efficiente, i.e. maggior n. di **e⁻** prodotti deve raggiungere il **1[^] dinodo**, ovunque siano generati sul catodo
- **tempo** impiegato dagli **e⁻** per giungere sul **1[^] 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 = δ → guadagno totale con n dinodi = δ^n

- Requisiti:
- alto δ (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

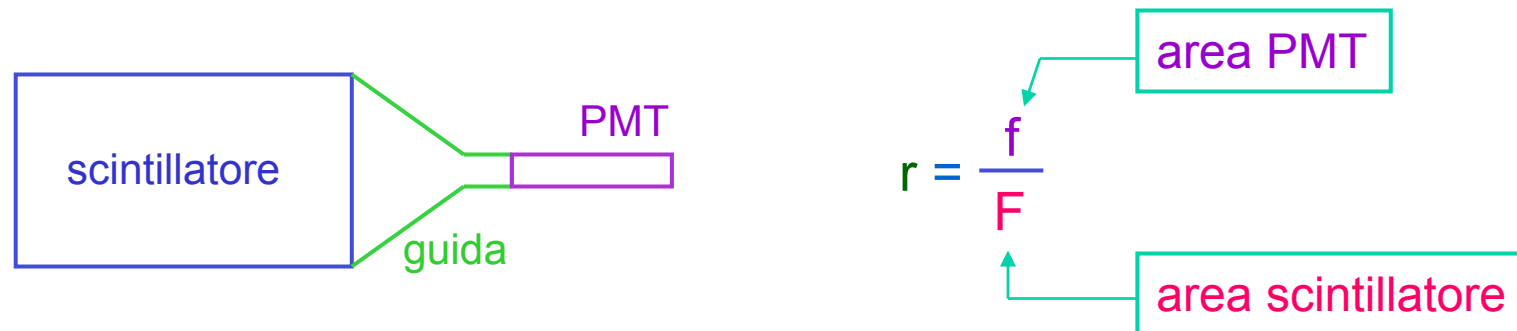

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\langle I_{\text{anodo}} \rangle}{I_b}$$

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

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



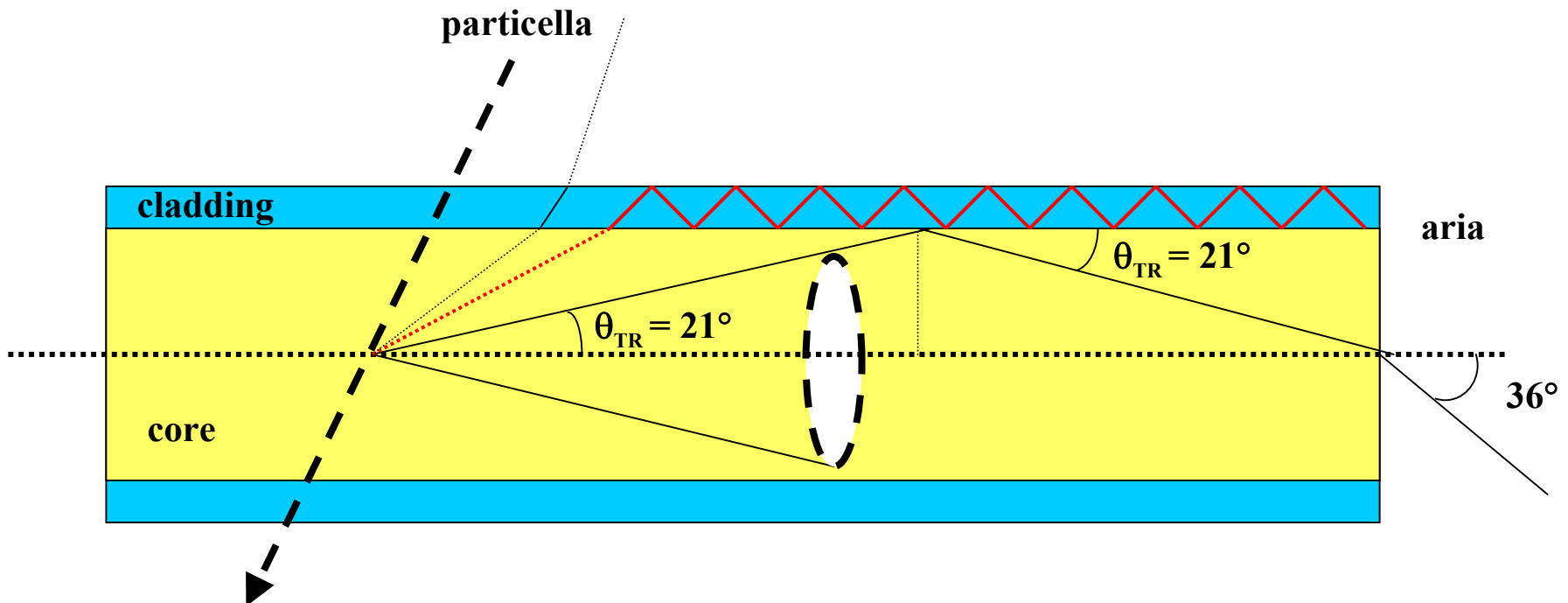
aumento di r per mezzo di geometrie più complicate (**twisted**): strisce separate di plexiglass attaccate all'estremità dello scintillatore e attorcigliate in modo da convergere nel PMT

Fibre Scintillanti

Le fibre scintillanti

Uno scintillatore puo` essere realizzato sotto forma di una fibra ottica. La fibra e` costituita da un nucleo interno chiamato “**core**” e da un rivestimento trasparente detto “**cladding**”. Il core e` un materiale plastico (polistirene) opportunamente “drogato” con **molecole organiche**, l’indice di rifrazione e` $n_1=1.6$. Il cladding e` costituito di plexiglass $n_2=1.49$.

La luce nella fibra si propaga nel **core** per **riflessioni multiple**, procedendo entro un cono di apertura $\Theta_{TR}=21^\circ$ (angolo di trapping, cioe` di “intrappolamento” della luce).



Lunghezza di attenuazione

Le fibre scintillanti presentano una **attenuazione esponenziale della luce** trasmessa in funzione della distanza percorsa dalla luce stessa.

$I(x) = I(0) e^{-x/\lambda}$ dove:

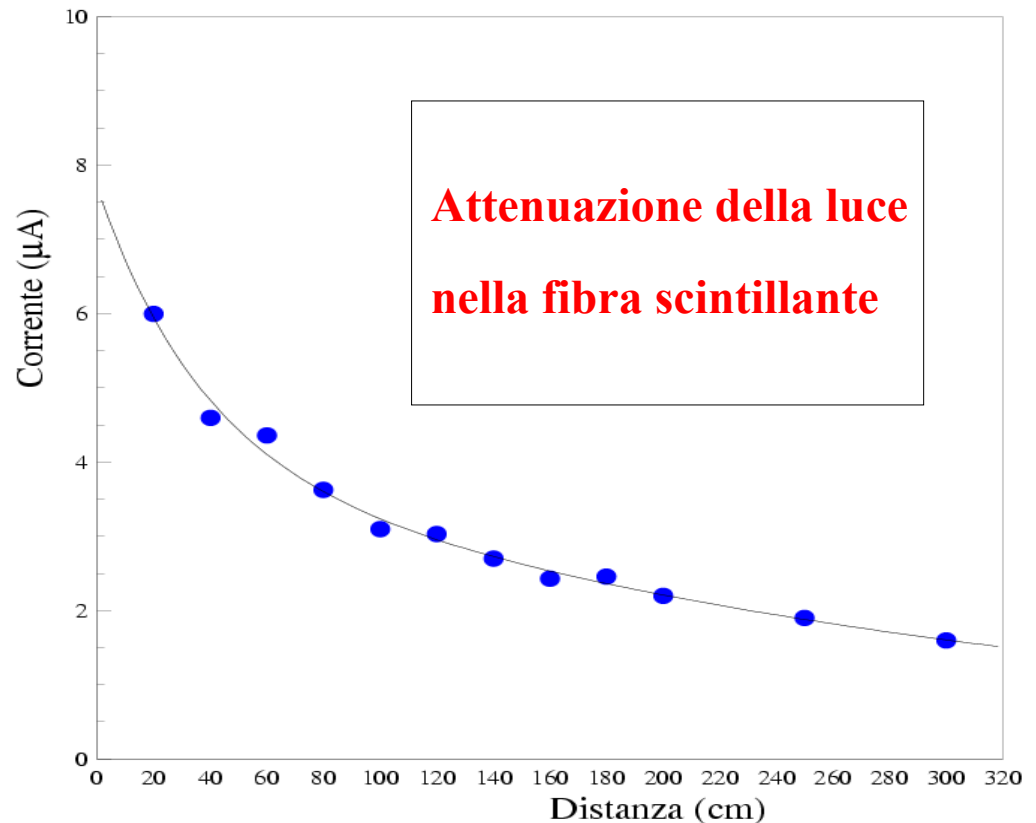
x = distanza percorsa dalla luce

λ = lunghezza di attenuazione

La lunghezza di attenuazione e' la distanza per cui la luce inizialmente prodotta si e' attenuata di un fattore "e" [$\ln(e)=1$] (cioe' $e \sim 2.7$).

Le fibre scintillanti hanno il vantaggio di avere una grande lunghezza di attenuazione ($\lambda=3\div 4$ m) e quindi il loro impiego e' consigliato nel caso di rivelatori "lunghi".

2002/06/27 17.55



Misura dei plateau di un PMT

Setup iniziale e possibili misure

Prima di utilizzare il rivelatore, occorre stabilire i valori di alcuni parametri (soglie dei discriminatori, tensione di lavoro dei fototubi). A tale scopo effettuiamo le seguenti operazioni :

1. Misura del plateau in soglia
2. Misura del plateau in tensione
3. Intercalibrazione dei canali dei fotomoltiplicatori PMi

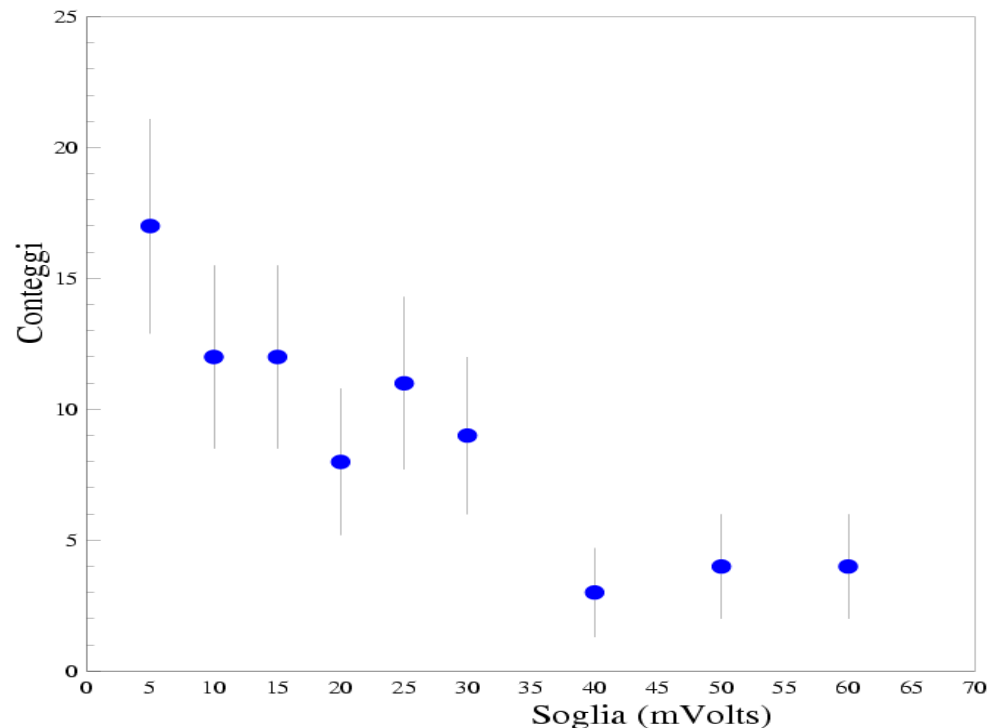
Plateau in soglia

Si misurano i conteggi al variare della **tensione di soglia del discriminatore**. La curva mostra un andamento prima decrescente e poi stabile, tipico di una curva di soglia. La zona “piatta” e’ detta “plateau” e permette di definire il valore della soglia da impostare.

Se la soglia scelta e’ **troppo bassa**, **non vengono filtrati gli eventi rumorosi**.

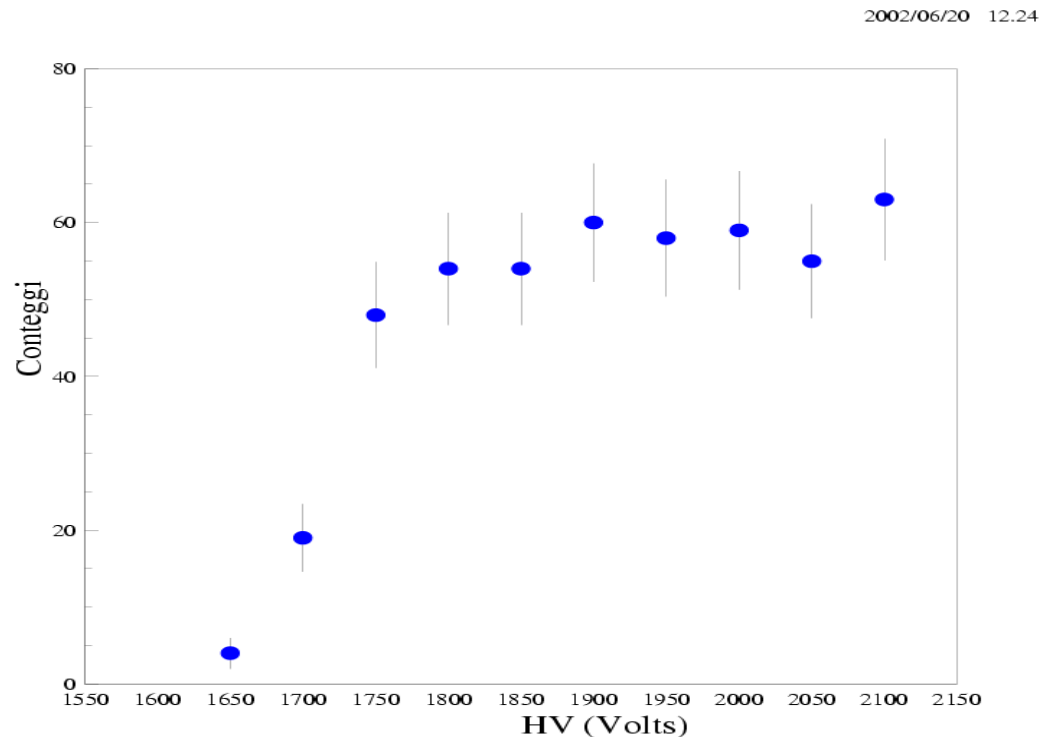
Se la soglia e’ **troppo alta**, non vengono acquisiti eventi “buoni” (**diminuisce l’efficienza**).

2002/06/20 12.24



Plateau in tensione

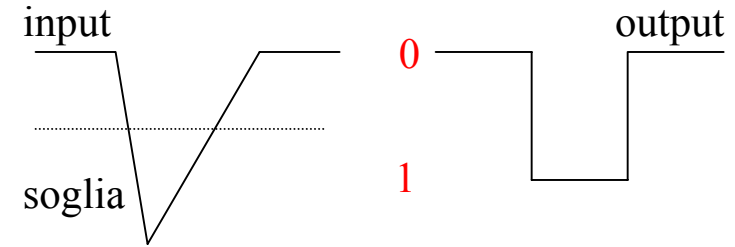
Si misura il numero di **conteggi** (in un intervallo di tempo fissato) che rappresenta il numero di particelle rivelate in funzione della **tensione di alimentazione** applicata al fotomoltiplicatore. Si puo` notare che l'efficienza del rivelatore cresce al variare della tensione, fino a raggiungere un valore di “plateau”. La **tensione di lavoro** viene scelta in questa zona, per avere la massima **stabilita`** del rivelatore (cioe` efficienza stabile nel tempo).



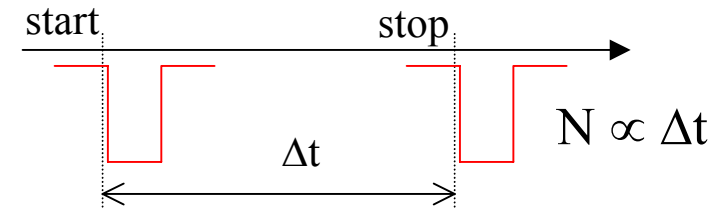
Strumentazione elettronica

Strumentazione utilizzata

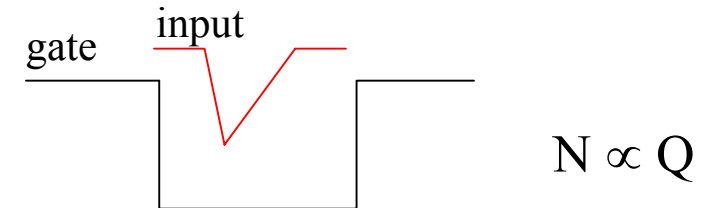
Discriminatori a soglia DISCR: circuiti che trasformano il segnale analogico proveniente dal fotomoltiplicatore in un segnale **digitale** (di valore 0 o 1), se il segnale in ingresso supera un certo valore minimo (detto soglia).



I **TDC** (Time to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale al tempo di arrivo della particella (stop).



Gli **ADC** (Analog to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale alla carica elettrica totale Q del segnale del PM, a sua volta proporzionale all'energia persa dalla particella nelle fibre.



Gli **SCALER** contano il numero di segnali digitali in ingresso.

Tutte le informazioni lette tramite un **Controllore CAMAC** vengono poi inviate ad un computer che acquisisce e memorizza i dati.