

Rivelatori

Caratteristiche generale e concetti preliminari

Indice

➤ **Caratteristiche generali**

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

➤ **Rivelatori a Scintillazione**

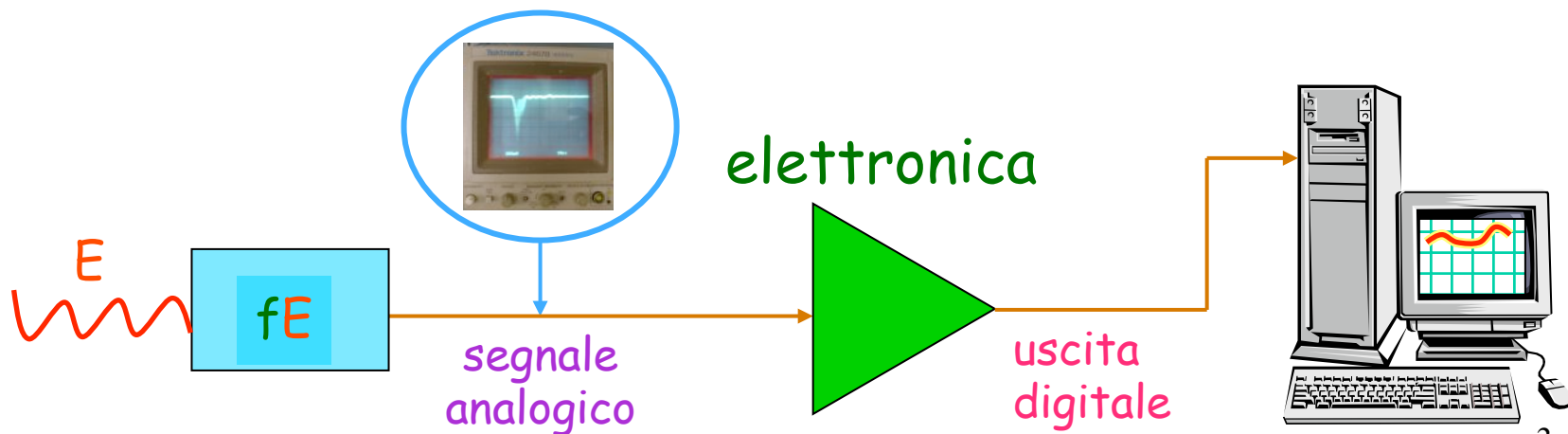
proprietà chimico-fisiche degli scintillatori
guide di luce & fotomoltiplicatori

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

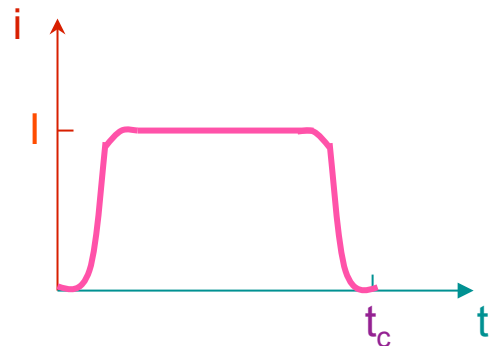
1 ps ÷ 1 ns in funzione
del tipo di rivelatore

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

Caratteristiche del segnale d' uscita:

- ❖ tempo di salita = t_c (rivelatore)
- ❖ tempo di salita = τ (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



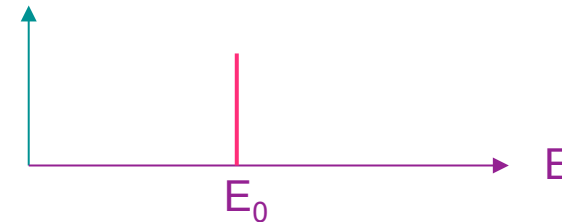
modo d' operazione più
comune: impulso $\oplus \tau \gg t_c$

Caratteristiche Generali

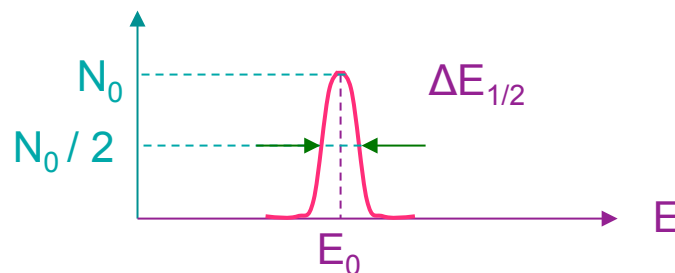
- C. Risoluzione Energetica** capacità del rivelatore di discriminare energie vicine

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 → particella che deposita energia E compie, in media, $J = E / \varepsilon$ ionizzazioni !!

Natura poissoniana del processo di ionizzazione → 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

{	NaI : R ~ 8 %
	GeLi : R ~ 0.1 %

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 $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

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

Concetti preliminari

2. Sorgenti radioattive

2 parametri fondamentali:

❖ **Attività** – n. di decadimenti al secondo → Becquerel (Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dec./s}$$

N.B. – vecchia unità: Curie (Ci) → $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dec./s}$

❖ **Costante di decadimento** – velocità di decadimento

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad [\lambda] = t^{-1}$$

Concetti preliminari

Grandezze derivate da λ :

- **vita media** τ - intervallo di tempo dopo il quale il n. iniziale di nuclei si è ridotto di un fattore **e**

$$\tau = \lambda^{-1}$$

- **tempo di dimezzamento** $t_{1/2}$ - intervallo di tempo dopo il quale metà dei nuclei iniziali è decaduta

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 \cong 0.693 \tau$$

Fasci di particelle \rightarrow **Flusso** Φ - n. particelle al secondo

$$[\Phi] = t^{-1}$$

Concetti preliminari


3. Sezione d'urto

misura della **probabilità** che si verifichi un certo processo d'interazione

Fascio di particelle che incide su un bersaglio :

Ipotesi – fascio molto + esteso del bersaglio;

– particelle distribuite in modo uniforme nello spazio e nel tempo


$$\sigma = \frac{\Phi \text{ diffuso}}{\Phi \text{ incidente} / \text{Superficie unitaria trasversa}}$$

i.e. \perp alla direzione del fascio

Concetti preliminari

- ✓ natura **casuale** del processo → **valori medi** su un numero elevato di intervalli di tempo di durata finita;
- ✓ $[\sigma] = L^2$ → posso immaginarla come l'area del centro di diffusione proiettata sul piano \perp alla direzione del fascio;
- ✓ **ordini di grandezza:**
 - $\sigma_{\text{atomica}} \approx 10^{-24} \text{ cm}^2$ (= 1 barn)
 - nucleo di raggio r → $\sigma_{\text{geom.}} = \pi r^2$
 $r \approx 10^{-13} \text{ cm}$ (= 1 fm) → $\sigma_{\text{geom}} \approx 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^2 = 30 \text{ mb}$

Concetti preliminari

Bersaglio reale: dimensioni finite → molti centri diffusori

Ipotesi – centri diffusori distribuiti uniformemente;

- bersaglio sottile (spessore = dx) → piccola probabilità che un centro diffusore sia esattamente dietro un altro



N = n. centri/Volume → n. centri su superficie $S \perp$ alla direzione di propagazione del fascio = $N S dx$



Probabilità di 1 collisione nello spessore dx :

$$dp = \frac{\Phi \text{ diffuso}}{\Phi \text{ incidente}} = \frac{\sigma \Phi_0 / S}{\Phi_0} N S dx = \underbrace{N \sigma}_{\downarrow w} dx$$

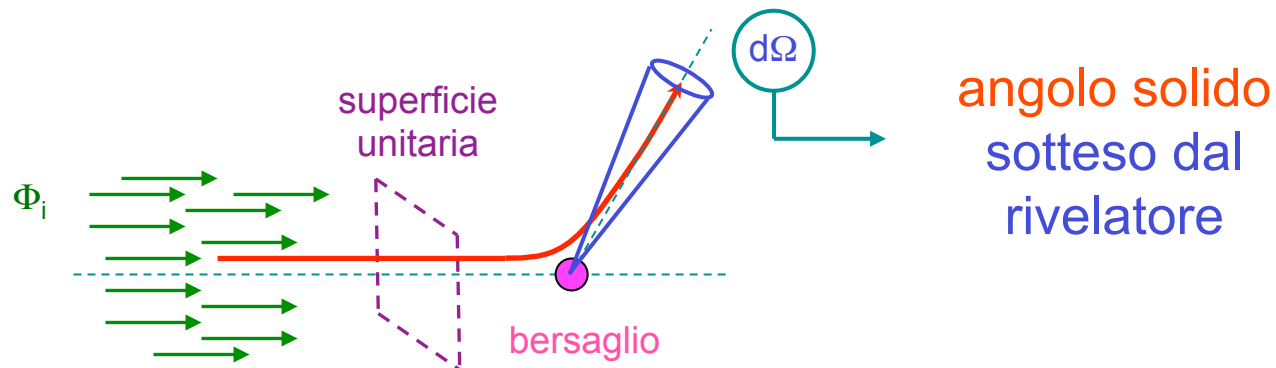
Concetti preliminari

N.B. – densità centri diffusori N $\left\{ \begin{array}{l} \text{nucleo} \rightarrow \rho N_0 / A \\ \text{elettroni} \rightarrow \rho N_0 Z / A \end{array} \right.$

- ρ = densità materiale;
- N_0 = n. di Avogadro (6.02×10^{23});
- A = n. di massa (n. protoni + n. neutroni);
- Z = n. atomico (n. elettroni)

Concetti preliminari

Rivelazione particelle **diffuse** → apparato di dimensioni **finite**



sezione d'urto differenziale

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\Phi \text{ diffuso in } d\Omega}{\Phi_i / \text{Superficie unitaria trasversa}}$$

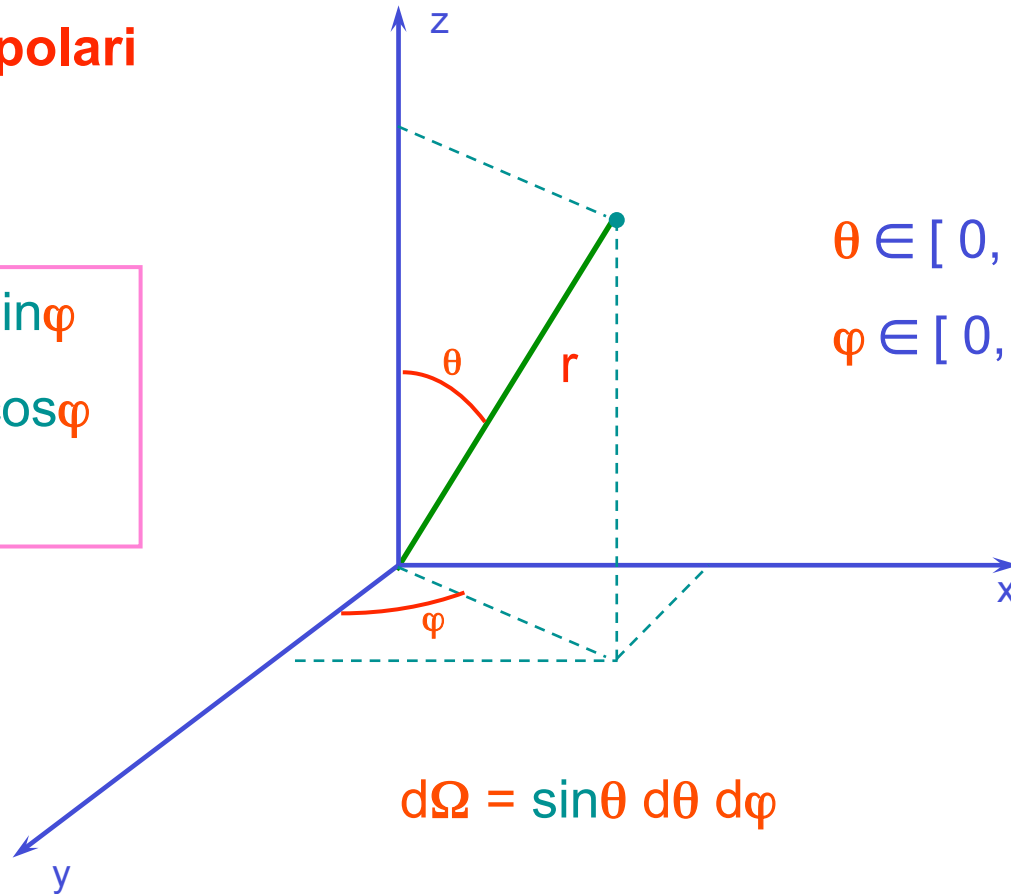
Concetti preliminari

Coordinate polari

$$x = r \sin\theta \sin\varphi$$

$$y = r \sin\theta \cos\varphi$$

$$z = r \cos\theta$$





Scintillatori

Stage Residenziale 2012

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 ($\sim \mu\text{s} \div \sim \text{ora}$) → **fosforescenza**

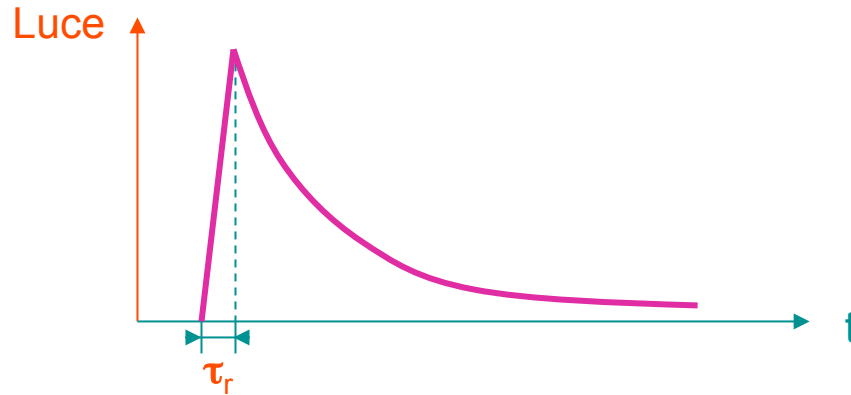
Andamento temporale del processo di **riemissione**:

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

n. totale di fotoni emessi

costante di decadimento

Scintillatori



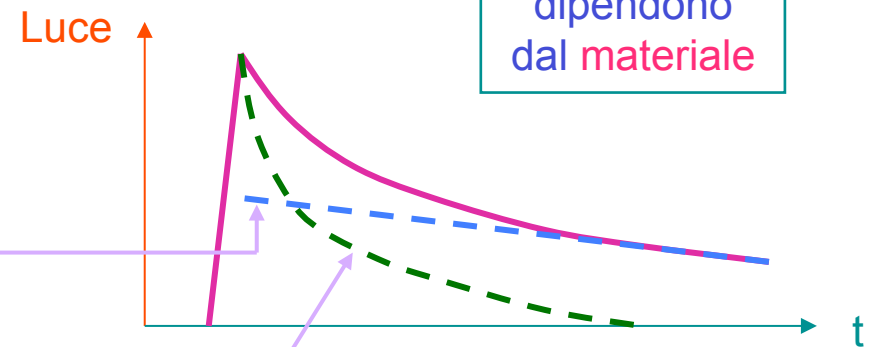
N.B. – tempo di salita $\tau_r \ll \tau_d$

In molti casi il comportamento è più complesso:

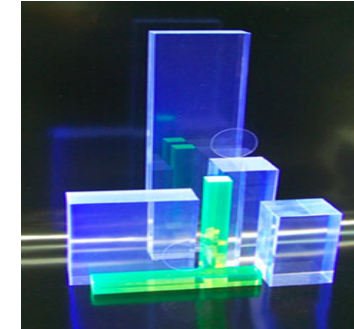
$$N(t) = A e^{-t/\tau_f} + B e^{-t/\tau_s}$$

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** 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)

Scintillatori Organici

composti di idrocarburi aromatici contenenti strutture ad anello benzenico condensate

Caratteristica essenziale: piccolo τ_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

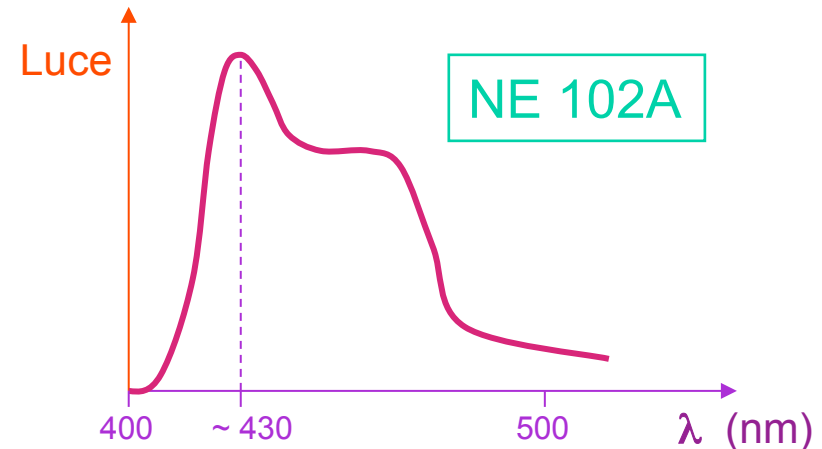
Scintillatori Organici

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**)

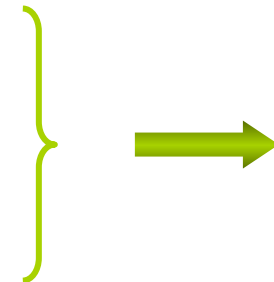
Scintillatori Inorganici

cristalli ionici dopati con centri attivatori (centri di colore)



Particella ionizzante → produzione di:

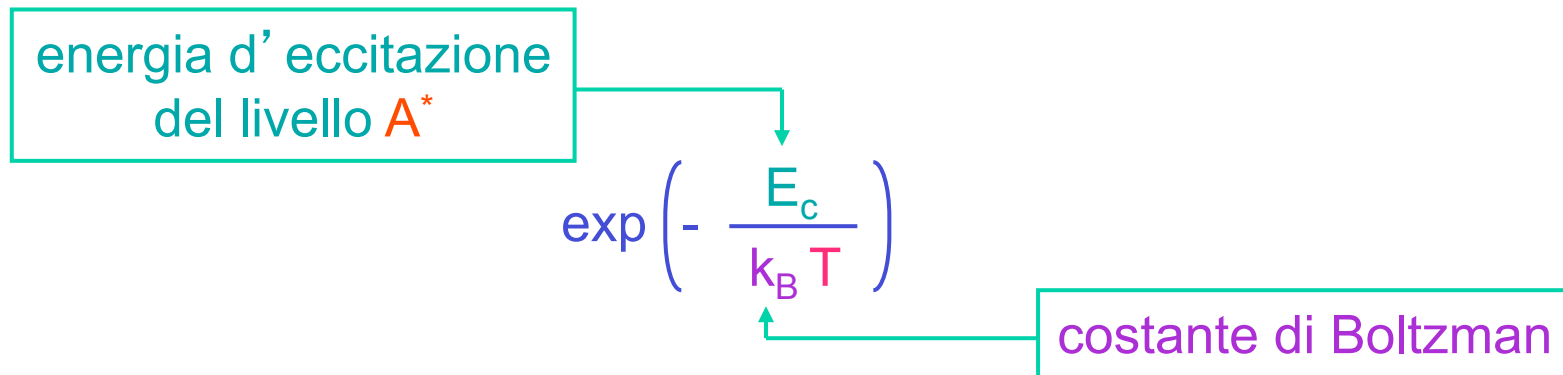
- elettroni liberi (●)
- lacune libere (○)
- coppie elettrone-lacuna = eccitoni (○--●)



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:

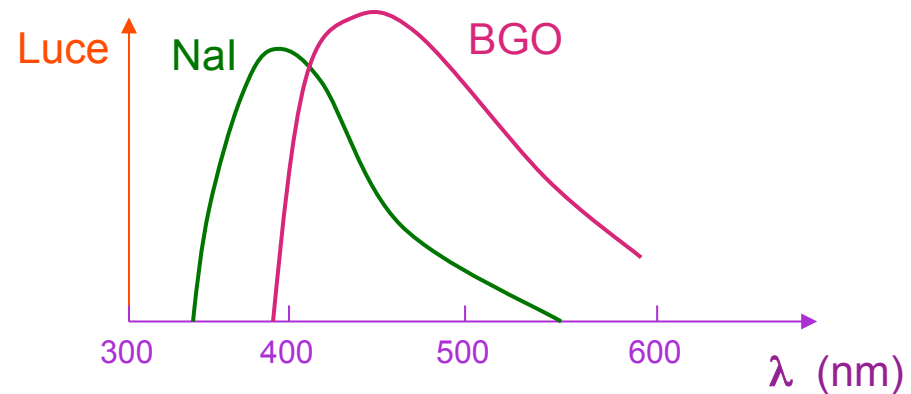


Luce » di quella emessa negli scintillatori organici → < fluttuazioni statistiche nel n. di fotoni emessi → migliore risoluzione energetica

Scintillatori Inorganici

Uso più frequente come rivelatore di raggi X, γ 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 (TI)

Fotomoltiplicatore

principio di funzionamento e accoppiamento

Fotomoltiplicatore

Tubo elettronico che converte la luce in corrente elettrica misurabile

Struttura di schematica di un PMT

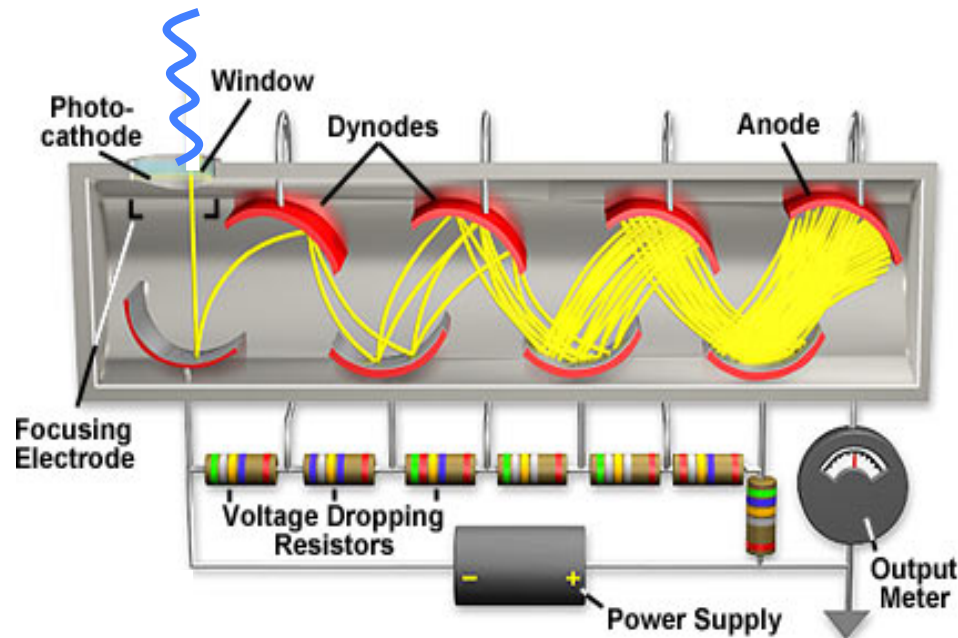
all'interno di un tubo di vetro sottovuoto si hanno:

- 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**

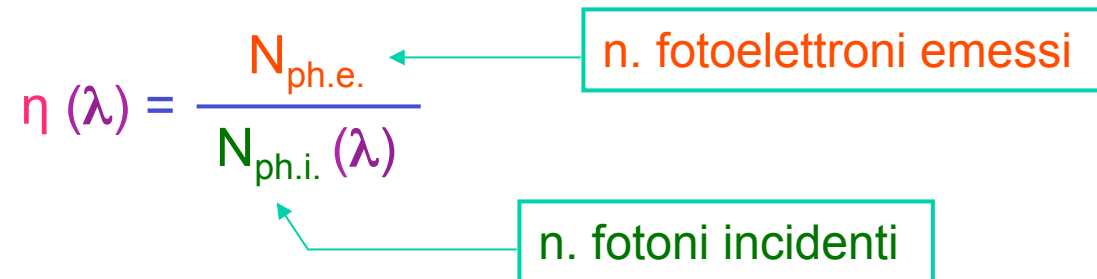
Fotomoltiplicatore

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

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

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

Fotomoltiplicatore

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



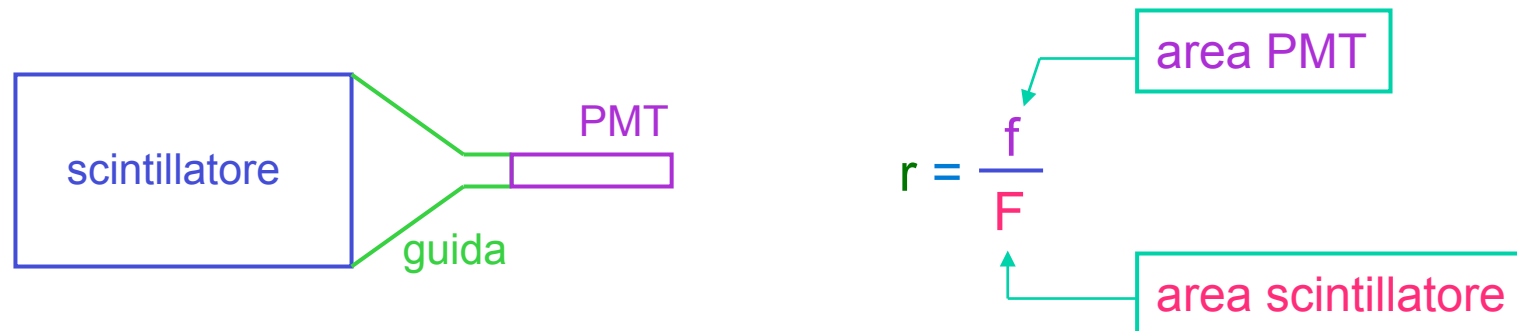
Soluzioni

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

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



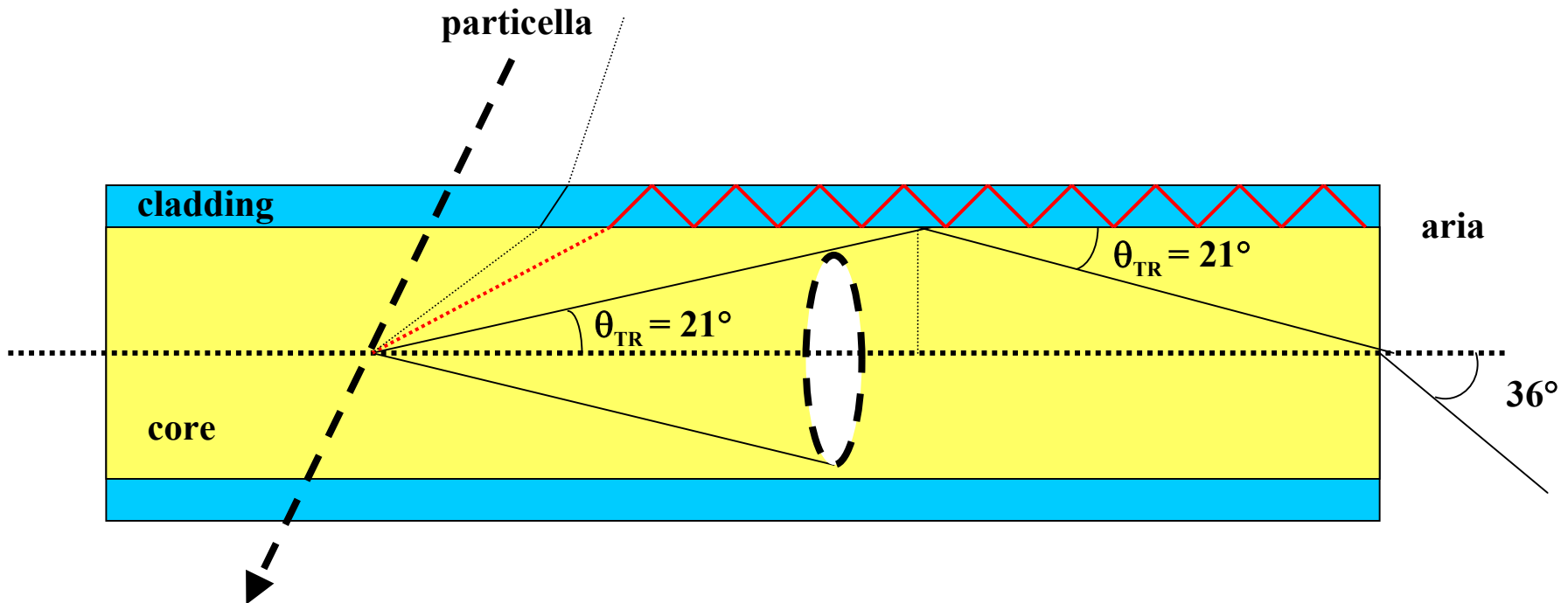
aumento di r per mezzo di geometrie più complicate (twisted): strisce separate di plexiglass attaccate all'estremità dello scintillatore e attorcigliate in modo da convergere nel PMT

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:

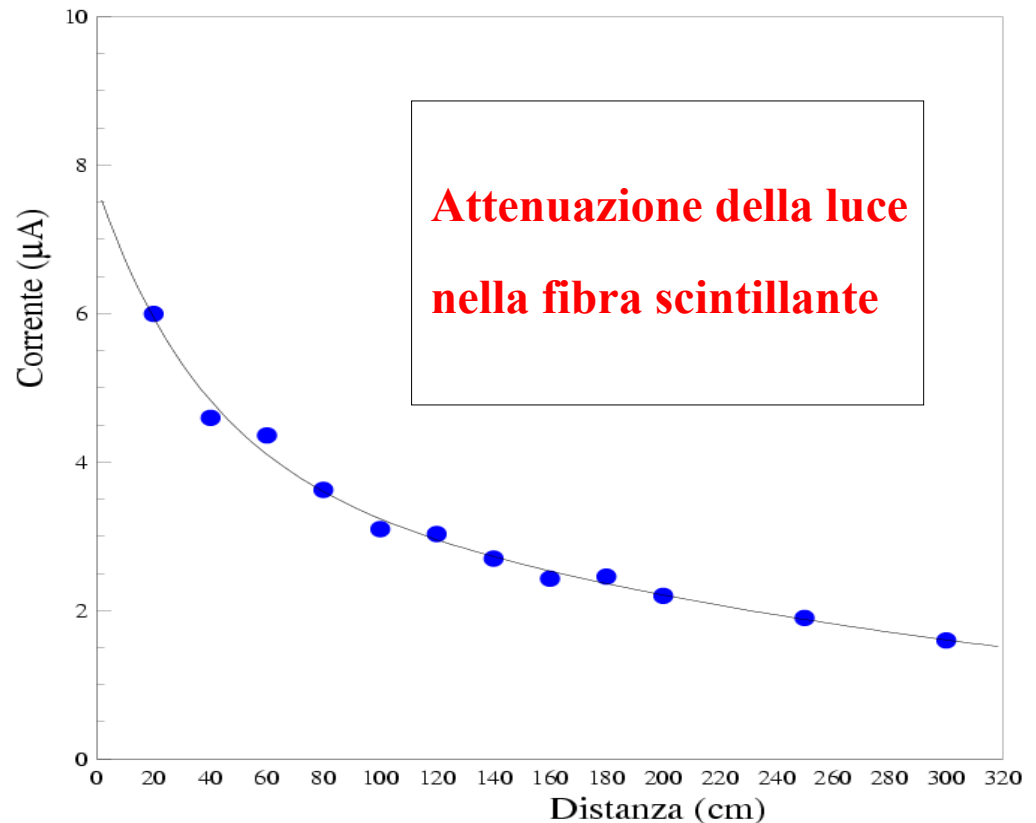
x = distanza percorsa dalla luce

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





Calorimetri

Stage Residenziale 2012

Indice

- ✓ Principi di funzionamento
- ✓ Tipi di calorimetri
- ✓ Esempi di calorimetri elettromagnetici
 - ❖ KLOE
 - ❖ ATLAS
 - ❖ CMS

Principi di base

- Trasformano l'energia della particella in un segnale che può essere misurato, tipicamente per eccitazione o ionizzazione, nella parte attiva del calorimetro
- Nei calorimetri l'energia viene misurata attraverso il totale assorbimento delle particelle nel mezzo assorbitore (metodo distruttivo).
- La risposta del rivelatore è proporzionale all'energia della particella $S = K E$
- Il principio di base è la formazione di una cascata:
 - Elettromagnetica (e^+ , e^- , γ)
 - Adronica (π , n , p , $k...$)
- La risoluzione energetica migliora all'aumentare dell'energia:

$$\sigma/E \propto 1/\sqrt{n} \propto 1/\sqrt{E}$$

Caratteristiche generali

- Non necessitano di campo magnetico
- I calorimetri possono rivelare:

}	Particelle cariche
	Particelle neutre
- In caso di copertura ermetica, è possibile misurare l'energia mancante
→ evidenza di neutrini e altre particelle debolmente interagenti
- La dimensione scala con il $\ln(E)$
- Possono misurare energia e posizione (facilmente segmentabili).
- PID
- Risposta veloce → trigger

Perdita di energia per elettroni

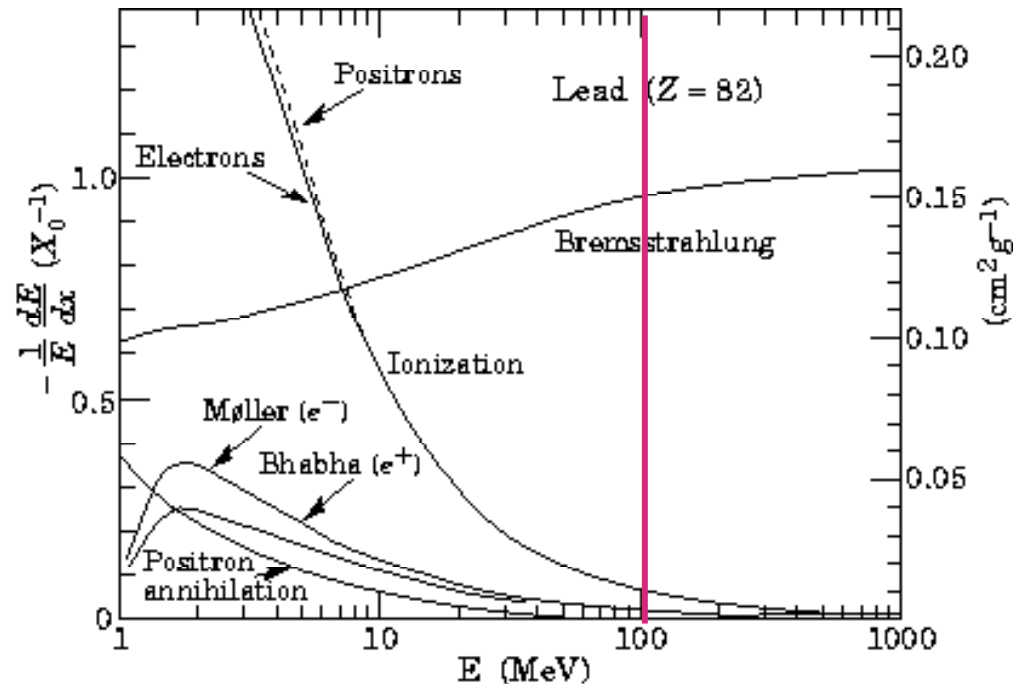
Gli elettroni perdono energia per collisione e per radiazione. Ad energie maggiori di 100 MeV, la perdita di energia per Bremsstrahlung, cioè della radiazione emessa dagli e^\pm che vengono deviati nel campo coulombiano dei nuclei dell'assorbitore è dominante.

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}} = -E/X_0$$

Lunghezza
di radiazione

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{tot}} = \left. \frac{dE}{dX} \right|_{\text{coll}} + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}}$$

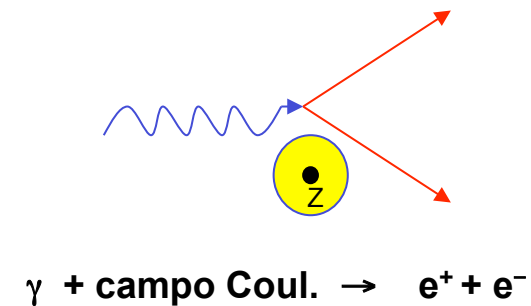
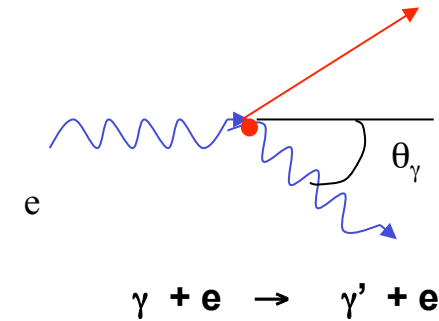
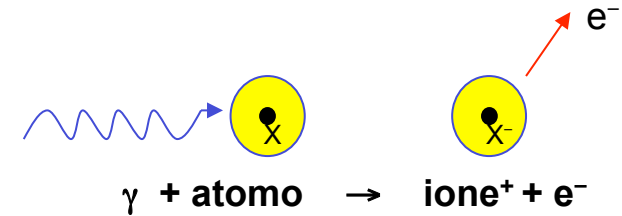
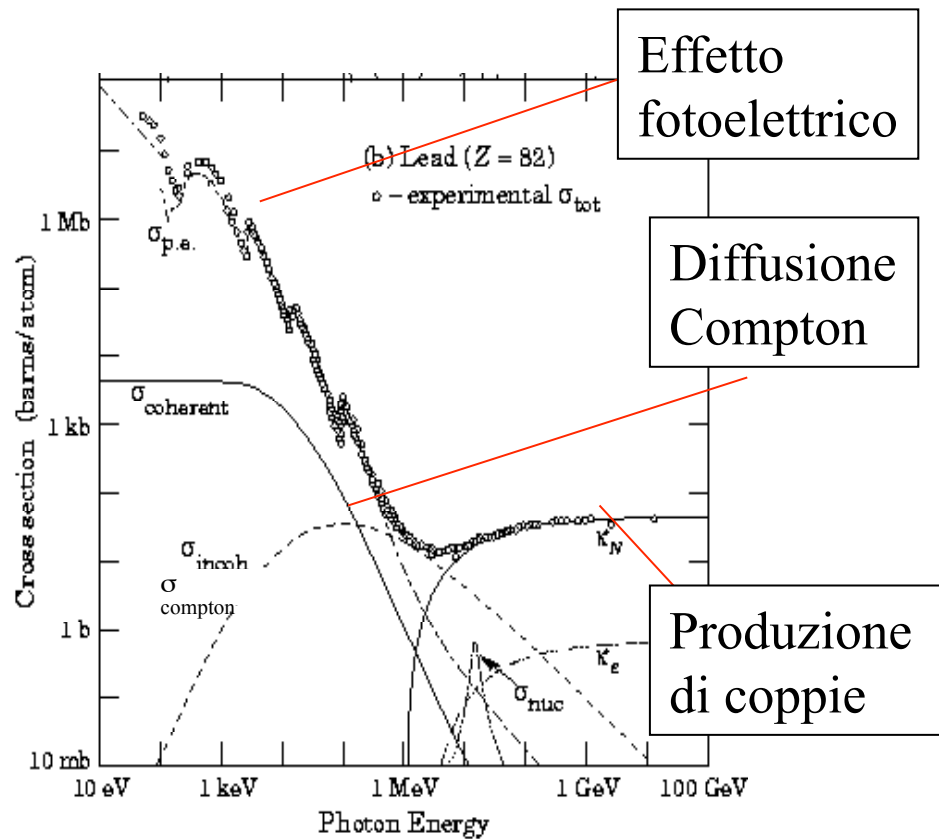


L'energia in cui $\left. \frac{dE}{dX} \right|_{\text{coll}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{irr}}$ è chiamata energia critica. Per $E > E_c$ la Brems. è dominante e l'energia decresce esponenzialmente come

$$E(x) = E_0 e^{(-x/X_0)}$$

Perdita di energia per fotoni

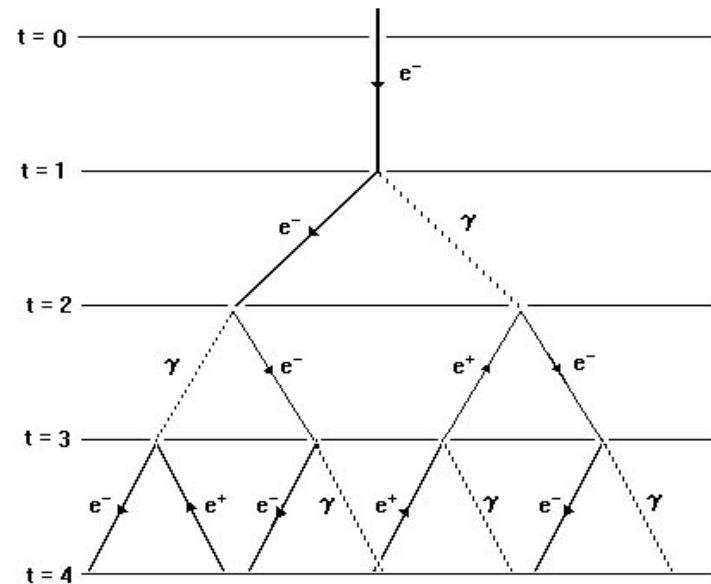
Per poter essere rivelato un **fotone** deve **creare o cedere** energia ad una **particella carica**



La creazione di coppie avviene solo per energie maggiori di $2 m_e$ ed è il fenomeno dominante per $E > 20 \text{ MeV}$.

Cascata elettromagnetica

Per energie abbastanza alte possiamo considerare solo la perdita di energia per radiazione (elettroni) e la produzione di coppie (fotoni). L'insieme dei 2 processi dà luogo alla cascata elettromagnetica.



Sviluppo longitudinale: aumento della cascata ogni X_0 . Ad ogni passo l'energia della particella viene divisa in 2 parti uguali.

Sviluppo trasversale: allargamento laterale della cascata dovuto allo scattering multiplo degli elettroni e ai fotoni di bassa energia.

Sviluppo longitudinale dello sciame

Dopo $n=X/X_0$ lunghezze di radiazione:

$$N_{\text{sec}} = 2^n$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{E_0}{2^n}$$

La cascata continua fino a quando:

$$E(t) > E_c$$

Il massimo dello sciame si ha per:

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

Dopo $t = t_{\text{max}}$ I processi dominanti sono la ionizzazione, l'effetto Compton e l'effetto fotoelettrico \rightarrow assorbimento.

Si forma in questo modo la **coda dello sciame**

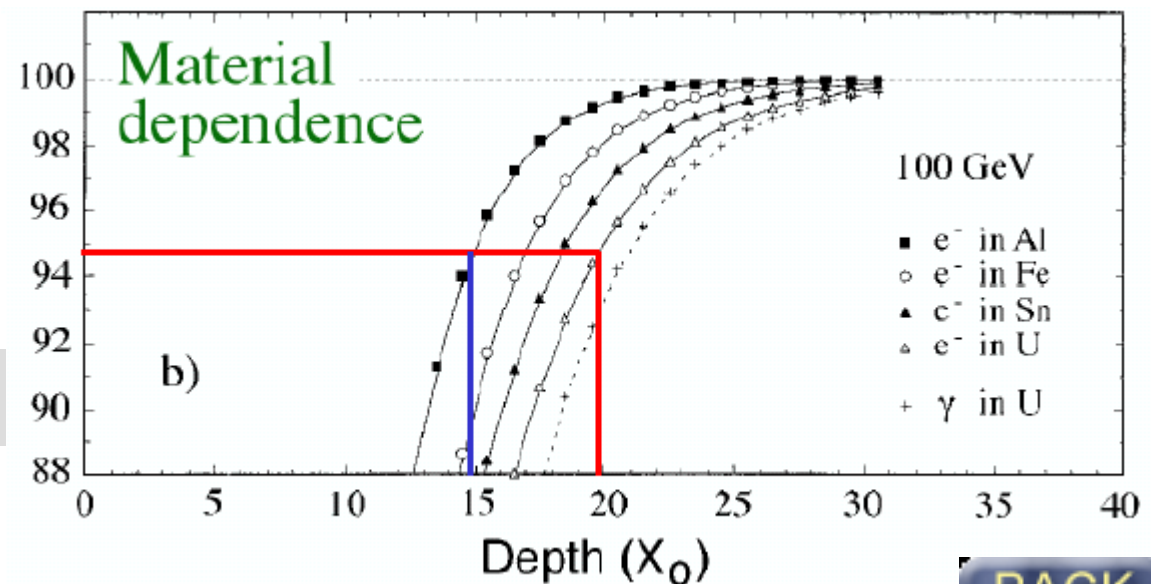
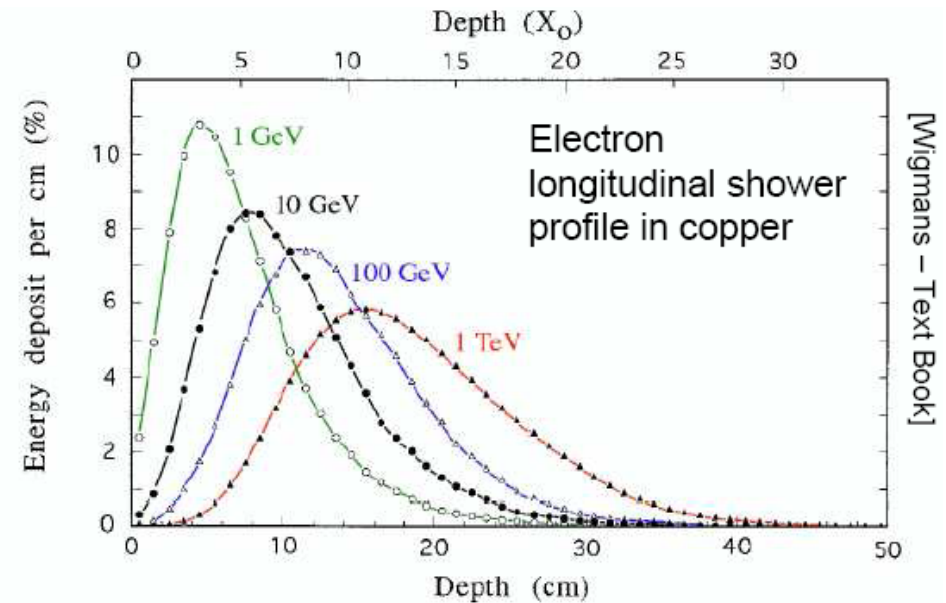
Sviluppo longitudinale dello sciame

Profilo longitudinale dello sciame in funzione dell'energia.

Il massimo dello sciame varia come $\ln(E)$

Per la scelta dell'assorbitore, occorre vedere quante X_0 sono necessarie per assicurarci il contenimento dello sciame.

$$X_{95\%} = X_{Max} + 0.08Z + 9.6$$



BACK

Sviluppo trasversale dello sciame

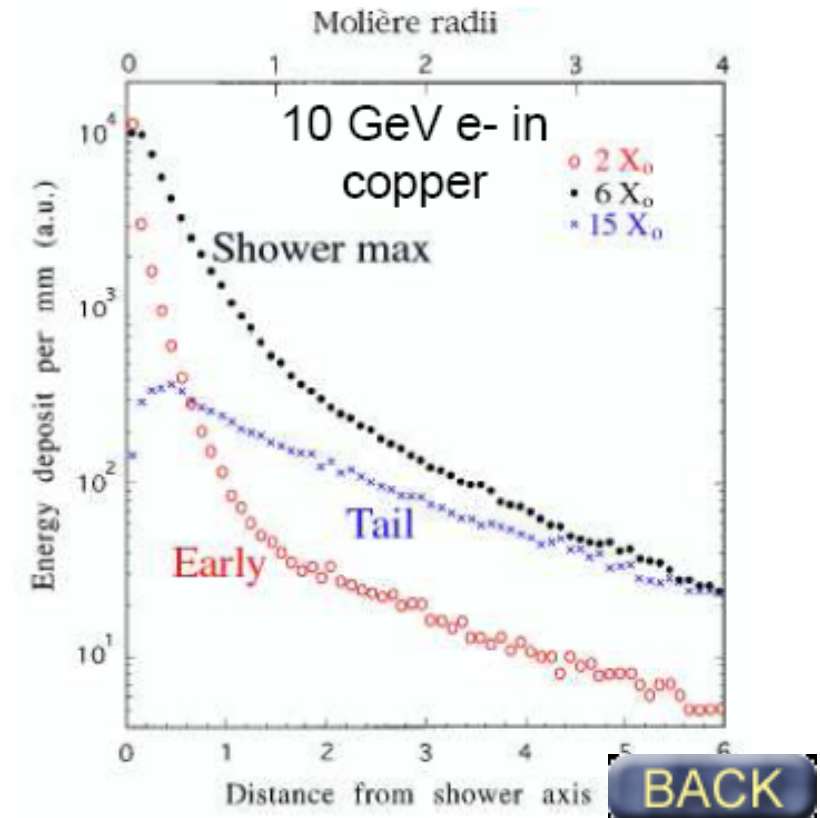
Lo sviluppo dello sciame comporta anche un allargamento laterale della cascata dovuto allo scattering multiplo degli elettroni e ai fotoni di bassa energia nel range Compton.

Per descrivere l'allargamento si definisce:

$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c (\text{MeV})} X_0 \quad [g / cm^2] \quad \text{Raggio di Moliere}$$

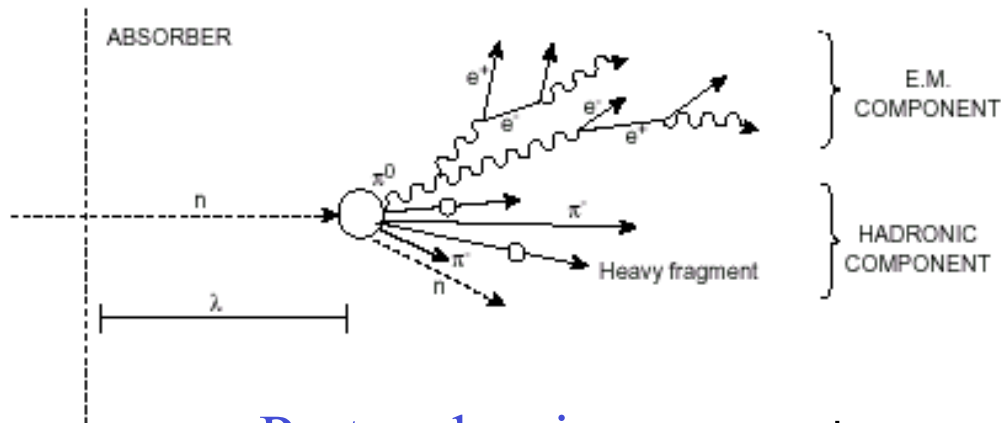
75% E_0 in $1R_M$;
95% in $2R_M$;
99% in $3.5R_M$

Material	Z	X_0/cm	E_c/MeV	R_M/cm
LAr	18	14	37	8
Fe	26	1.8	22	1.7
Lead	82	0.56	7.4	1.6



Rivelazione di adroni

Gli adroni nei materiali, oltre alla perdita di energia se carichi, danno origine ad interazioni nucleari eccitando o frantumando il nucleo.



A parità di energia, le cascate adroniche sono molto più lunghe e ampie di quelle elettromagnetiche.

Parte adronica

+

Parte elettromagnetica



Pioni carichi, K, neutroni.

Inoltre, avvengono fenomeni che rilasciano energia invisibile nel rivelatore (rottura di nuclei pesanti, neutrini).

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \rightarrow$ cascata EM
 $N(\pi^0) \propto \ln(E)$

Grosse fluttuazioni energetiche → limitata risoluzione energetica

Rivelazione di adroni

In analogia con l'interazione elettromagnetica si definisce il coefficiente di assorbimento adronico:

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}}$$

Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_a [g/cm ²]
Hydrogen (gas)	1	1.01	0.0899 (g/l)	63	50.8
Helium (gas)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94	65.1
Beryllium	4	9.01	1.848	65.19	75.2
Carbon	6	12.01	2.265	43	86.3
Nitrogen (gas)	7	14.01	1.25 (g/l)	38	87.8
Oxygen (gas)	8	16.00	1.428 (g/l)	34	91.0
Aluminium	13	26.98	2.7	24	106.4
Silicon	14	28.09	2.33	22	106.0
Iron	26	55.85	7.87	13.9	131.9
Copper	29	63.55	8.96	12.9	134.9
Tungsten	74	183.85	19.3	6.8	185.0
Lead	82	207.19	11.35	6.4	194.0
Uranium	92	238.03	18.95	6.0	199.0

Sviluppo longitudinale dello sciame: il 95% della cascata è contenuta in una lunghezza:

$$t_{95\%} = a \ln E + b$$

E = energia della radiazione incidente

a, b = costanti dipendenti dall'assorbitore

Sviluppo laterale dello sciame: lo sciame consiste di core centrale + un alone. Il 95% dello sciame è contenuto in un cilindro di raggio λ_a .

Tipi di calorimetri

Tipi di calorimetri

Dai depositi energetici si deve generare il “segnale”.

Calorimetri omogenei: singolo materiale che agisce contemporaneamente da assorbitore e mezzo attivo che trasforma tutta l'energia depositata in segnale.

Calorimetri eterogenei: assorbitore e mezzo attivo costituiti di materiale differente. Il segnale è generato da una parte dell'energia depositata nel mezzo attivo.

I calorimetri EM sono più piccoli di quelli HAD in virtù della differenza di dimensione delle cascate ($\lambda_a > X_0$)

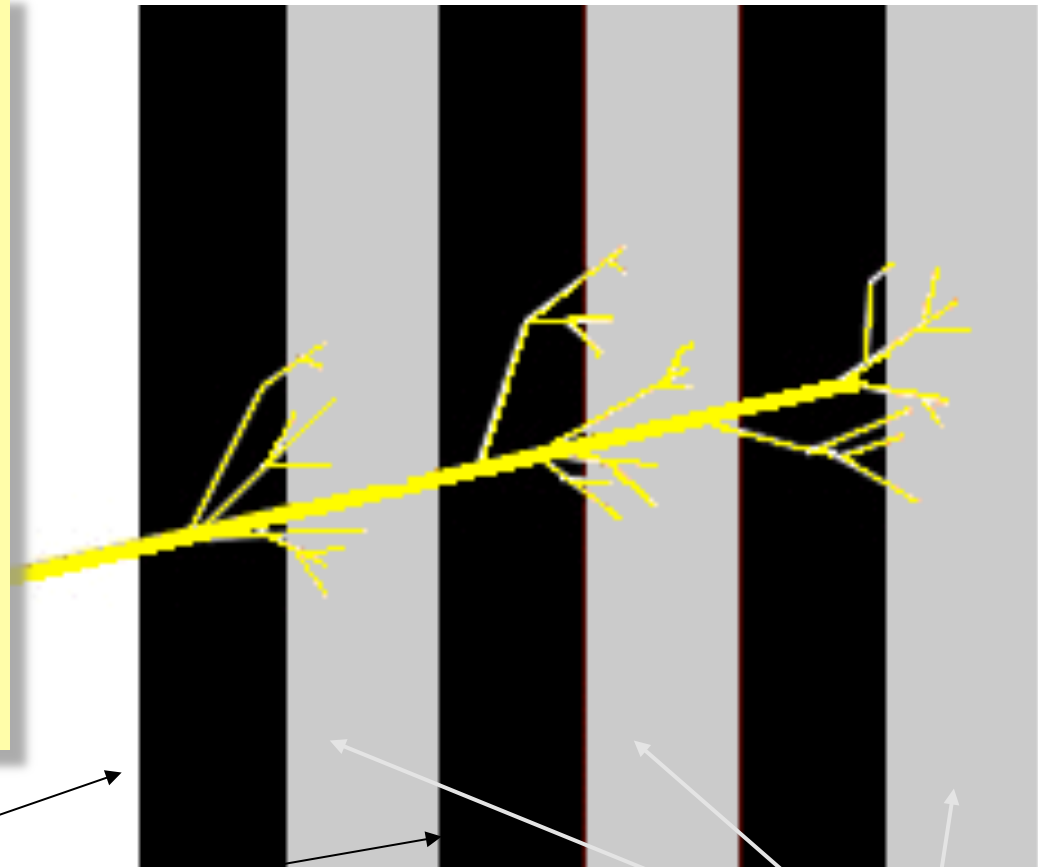
I calorimetri elettromagnetici sono i più semplici da comprendere in quanto il fotone e l'elettrone che incidono creano degli sciami nel materiale il cui comportamento è oggi completamente descritto da simulazioni dettagliate al computer.

Calorimetri eterogenei

Struttura a sandwich!!

Strati di assorbitore e materiale attivo intervallati:

- Facilità di montaggio
- Costi ridotti
- Alta versatilità in
 - granularità di lettura
 - componente attiva

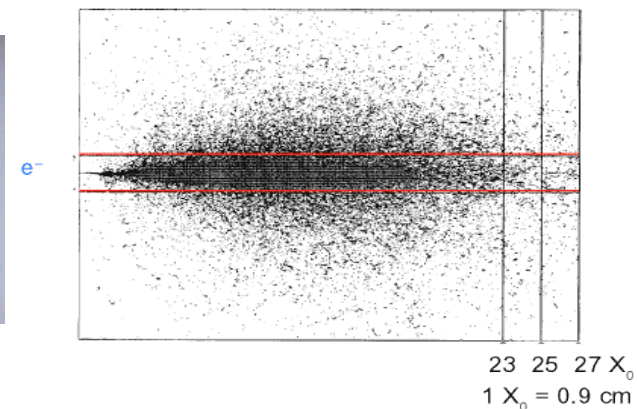
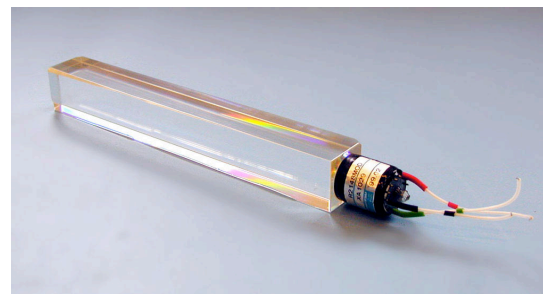
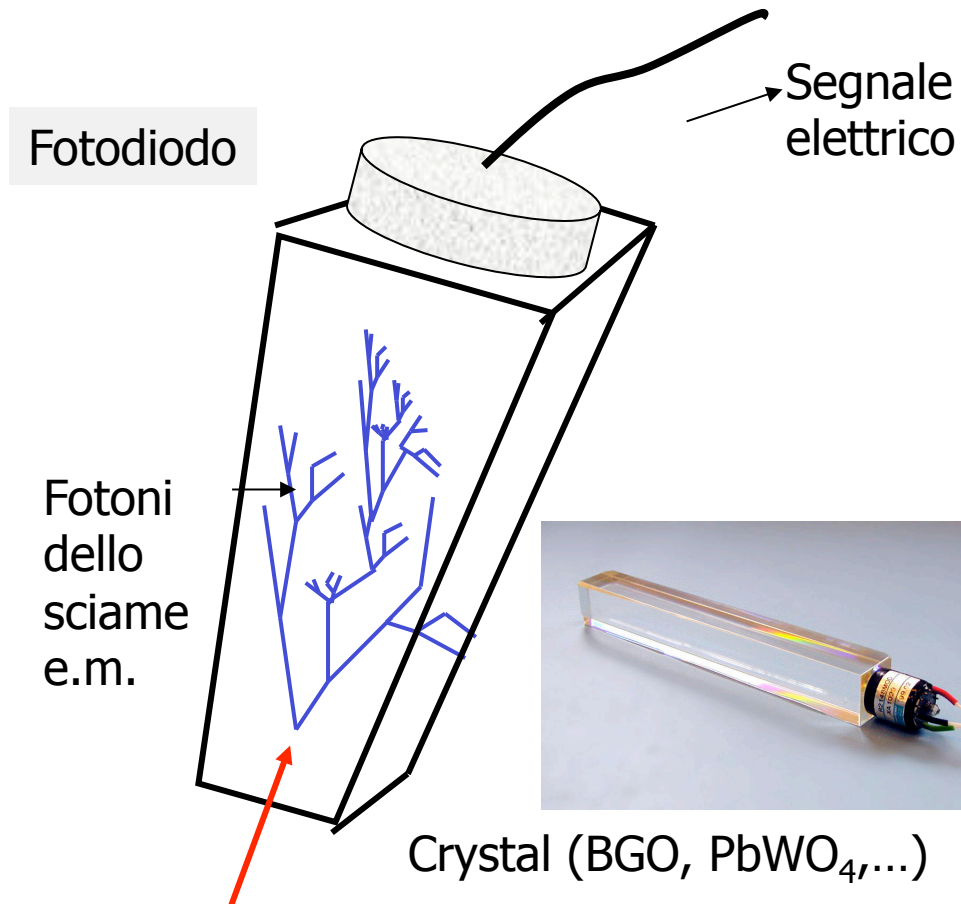


Materiali assorbenti
Densi ad alto Z:
PB, W ...

Rivelatori di particelle cariche,
scintillatori, camere proporzionali,
camere a ionizzazione (Kr, Xe),
fibre scintillanti

Calorimetri omogenei

Calorimetri composti solo di componente attiva



Questi cristalli sono usati anche in altri campi, in particolare in campo medico perchè permettono alte risoluzioni per fotoni di bassa energia (PET)

Risoluzioni energetiche

La risoluzione energetica di un calorimetro può essere parametrizzata come:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

-a → **termine statistico o di campionamento:**

- fluttuazioni intrinseche dello sciame
- fluttuazioni di campionamento

-b → **termine di rumore**

- rumore elettronico
- pileup – fluttuazioni energetiche dovute ad altre sorgenti

-c → **termine costante**

- non uniformità nella produzione e raccolta del segnale
- errori di calibrazione
- fluttuazioni della componente em dello sciame adronico

HCAL

I calorimetri adronici sono molto più complicati di quelli EM perchè gli sciame creati dagli adroni nel materiale non sono perfettamente descrivibili.

In uno sciame adronico troviamo:

- 1) complicata produzione di secondari
- 2) presenza di componente elettromagnetica per creazione di π^0 [$f_{em}(E) \approx 0.11 \ln(E)$]
- 3) neutrini e muoni da decadimenti deboli di π , K
- 4) processi nucleari

Oltre ai fenomeni di campionamento e raccolta segnale questi calorimetri mostrano **un limite intrinseco nella risoluzione** causato dalle fluttuazioni in energia non rivelata (3)+(4).

Inoltre se c'è diversità nella risposta tra elettroni e adroni ($e/h > 1$) si crea a causa di (2) una non-linearità nella risposta ed un deterioramento della risoluzione.

Si chiamano compensati i calorimetri adronici per i quali si impone $e/h = 1$.

Per questi calorimetri si ottengono risoluzioni:

$$\sigma/E = 44 \% \sqrt{E(\text{GeV})} \text{ vs } 80\text{-}100 \% \text{ per quelli non compensati}$$

Il calorimetro elettromagnetico di

KLOE

Es. calorimetro EM: KLOE

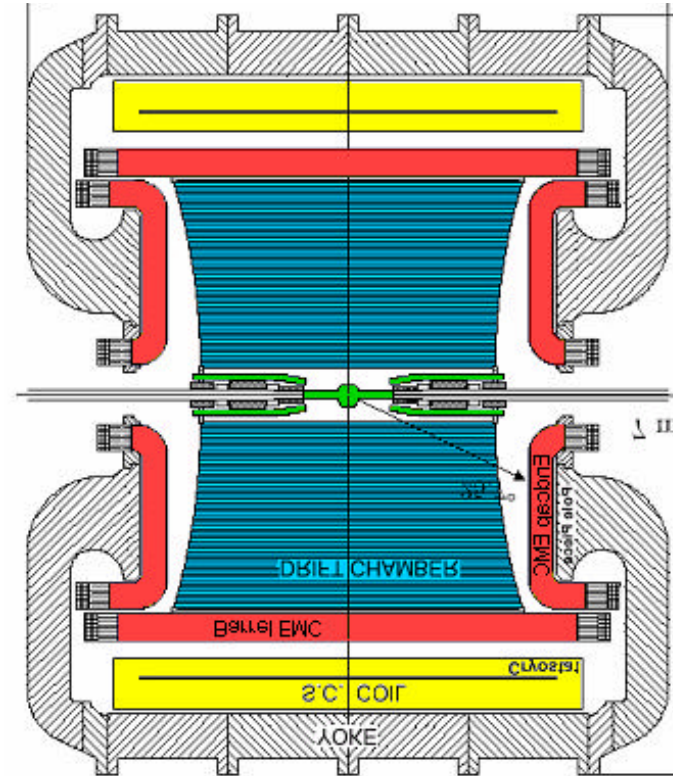
In questo caso il calorimetro deve:

- distinguere tra $K_L \rightarrow 3\pi^0$ e $K_L \rightarrow 2\pi^0$
- ricostruire il vertice fotonico di decadimento con risoluzioni del cm
- distinguere tra π e μ

Calorimetro a campionamento:

Piombo-fibre scintillanti

- struttura cilindrica compatta.
- spessore dei moduli 23 cm $\rightarrow 15 X_0$
- copertura 98% dell'angolo solido
 - barrel 24 moduli
 - endcap 32 moduli ciascuno
- 4880 PM
- granularità $4.4 \times 4.4 \text{ cm}^2$



$$\sigma_t = \frac{57 \text{ ps}}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$

I calorimetri EM di ATLAS e CMS

Es. di calorimetro EM: ATLAS

Il calorimetro EM è studiato per rivelare i fotoni e le coppie e+e- del decadimento del H

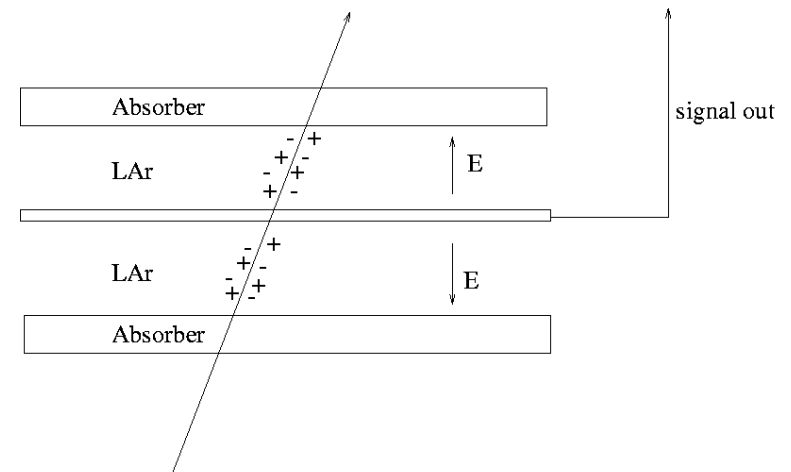
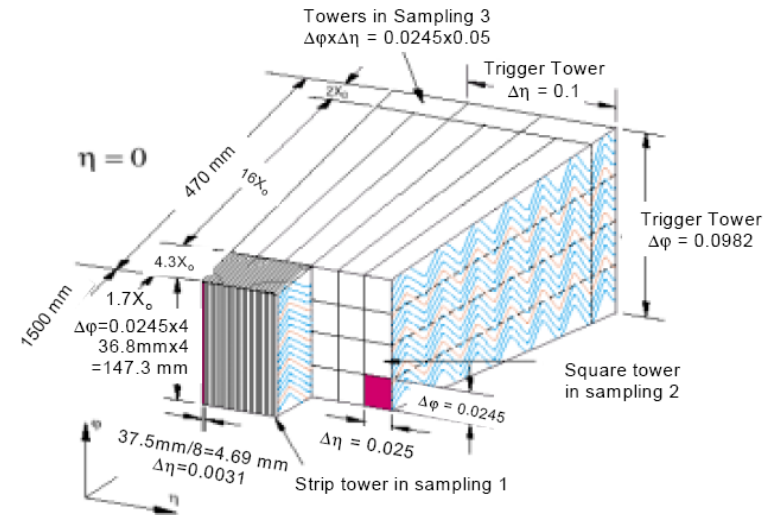
Calorimetro a sampling: **Piombo-liqAr**

- Buona resistenza alla radiazione
- Buona ermiticità
- Spessore:
 - barrel $>24X_0$
 - endcap $>26X_0$

~200000 canali

Il passaggio di una particella carica nell'Argon crea coppie elettrone-ione che si muovono grazie al campo elettrico applicato. Questa tecnica si basa sulla rivelazione della corrente prodotta da questo movimento.

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.25}{E(\text{GeV})} \oplus 0.7\%$$



Es. calorimetro EM: CMS

Le condizioni “al contorno” sono le stesse di ATLAS (alta radiazione, detector veloce, alta granularità)

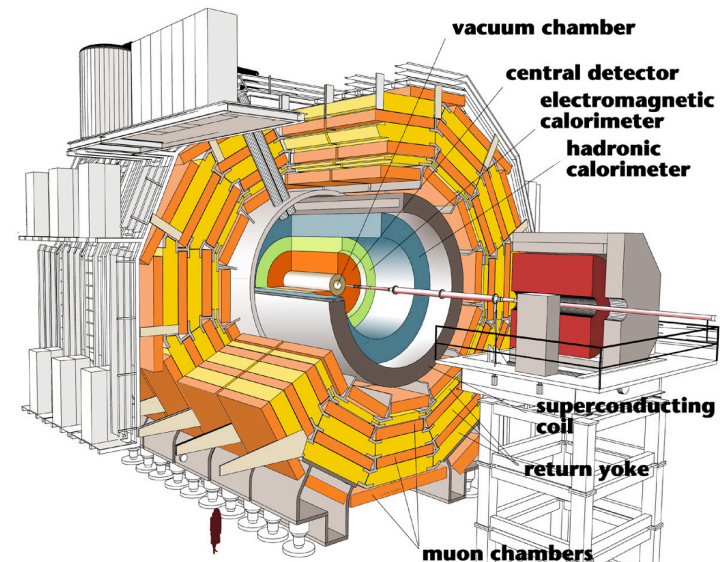
Calorimetro omogeneo formato da cristalli di PbWO_4

- ottima risoluzione energetica
- calorimetro compatto
- basso LY \rightarrow scelta rivelatori fotoni

Barrel: 612000 cristalli letti da 2 APD
Endcap: 14488 cristalli letti da 1 PM

APD: funzionamento in alto B, buona risoluzione e amplificazione x25

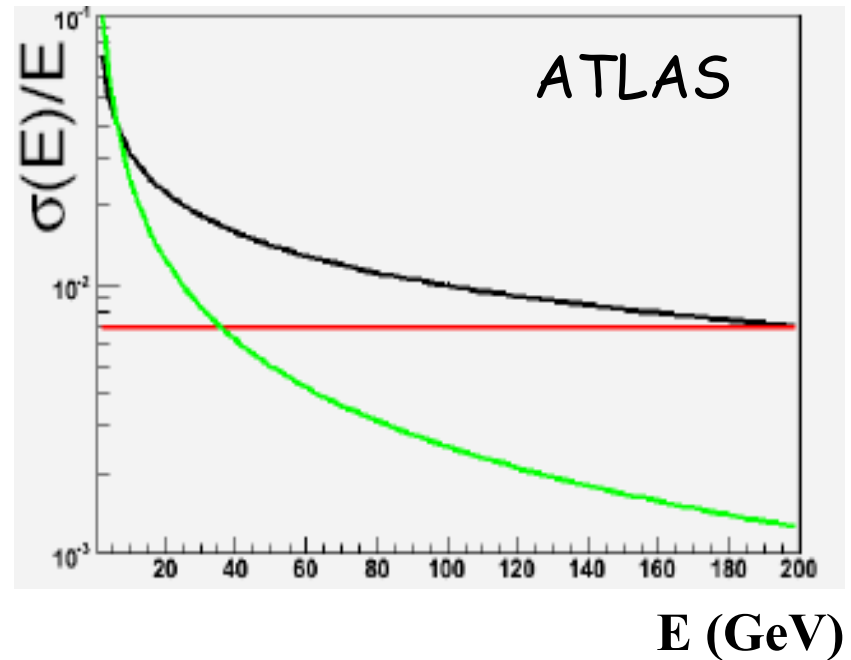
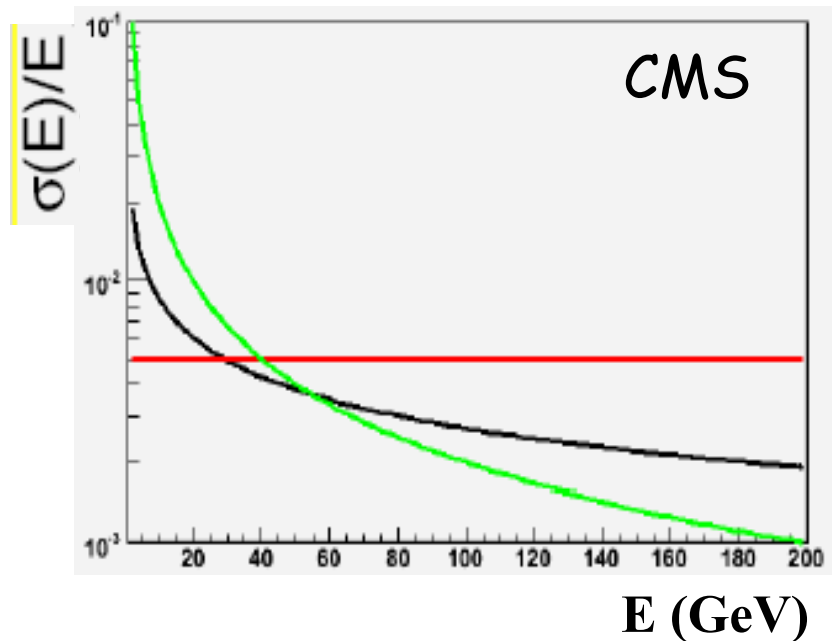
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 0.55\% \oplus \frac{0.2}{E}$$



Parameter		Value
Radiation length	cm	0.89
Moliere radius	cm	2.2
Hardness	Moh	4
Refractive index		2.3
Peak emission	nm	440
% of light in 25 ns		80%
Light yield (23 cm)	γ/MeV	100

Confronto EMC ATLAS-CMS

Confronto tra le risoluzioni dei prototipi:



CMS, ad alta energia, ha una migliore risoluzione energetica

Confronto EMC ATLAS-CMS

Confronto nella rivelazioni del decadimento $H \rightarrow \gamma\gamma$

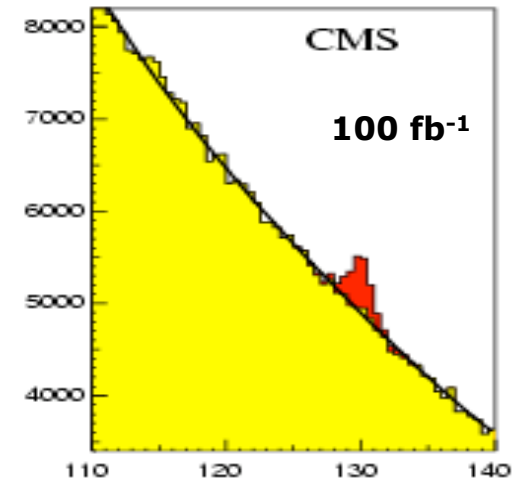
Larghezza sperimentale di $m_{\gamma\gamma} = 2E_1E_2(1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})$:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\frac{\sigma_1}{E_1} \right) \oplus \left(\frac{\sigma_2}{E_2} \right) \oplus \left(\frac{\sigma_\vartheta}{\text{tg}(\vartheta_{\gamma\gamma}/2)} \right) \right]$$

Risoluzioni energetiche
 ATLAS=1.2 GeV
 CMS=0.7 GeV

$$\sigma_\vartheta = \frac{50 \text{ mrad}}{\sqrt{E}}$$

Uguale per
 ATLAS e
 CMS



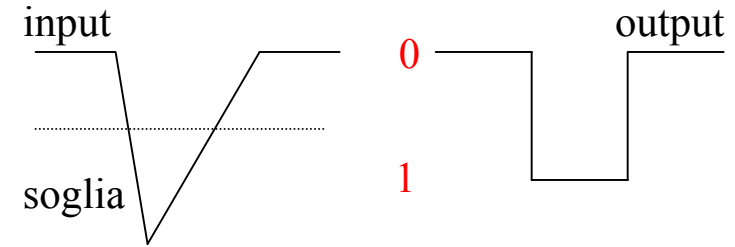
CMS punta ad una migliore risoluzione energetica con un termine costante basso

ATLAS utilizza un calorimetro segmentato e questo consente di fare misure ridondanti dell'angolo dei fotoni → migliore misura della direzione di arrivo dei fotoni

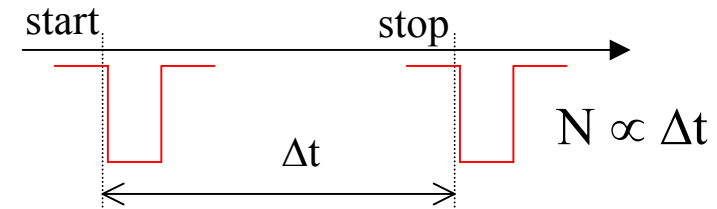
Strumentazione elettronica

Strumentazione utilizzata

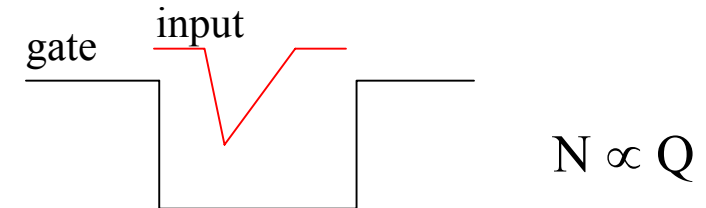
Discriminatori a soglia DISCR: circuiti che trasformano il segnale analogico proveniente dal fotomoltiplicatore in un segnale **digitale** (di valore 0 o 1), se il segnale in ingresso supera un certo valore minimo (detto soglia).



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.

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

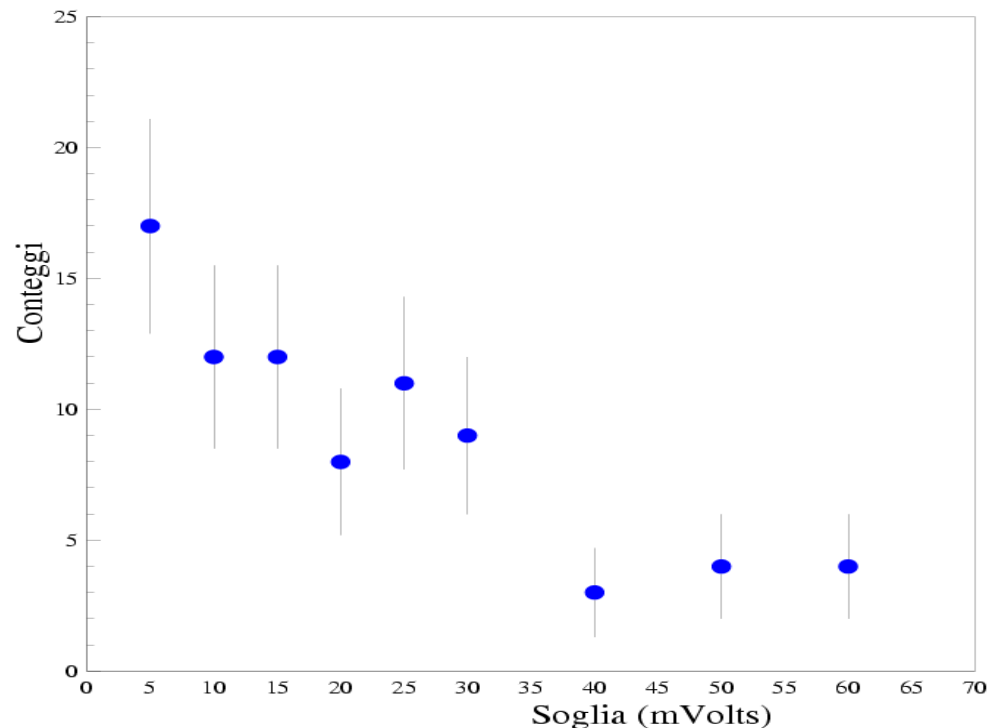
Plateau in soglia

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**.

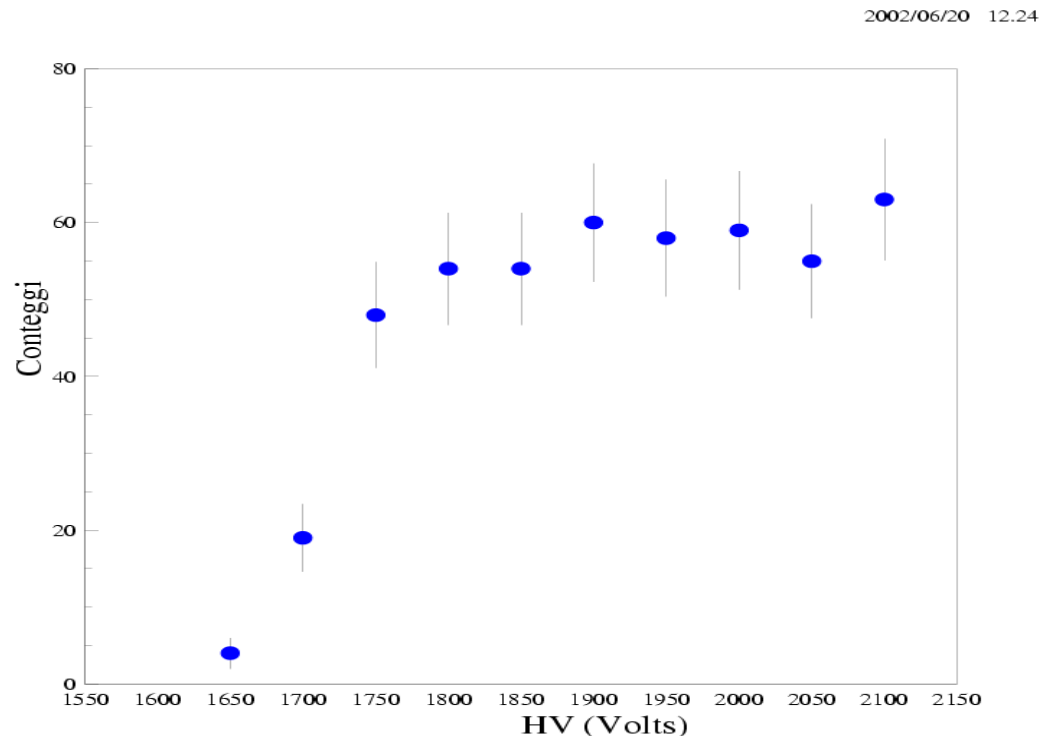
Se la soglia e’ **troppo alta**, non vengono acquisiti eventi “buoni” (**diminuisce l’efficienza**).

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).

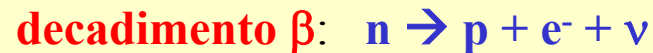


Metodi di calibrazione di un rivelatore

Calibrazione relativa con sorgente radioattiva

Per ogni elemento chimico di **numero atomico Z** (numero di protoni nel nucleo) ci sono diversi **isotopi**: nuclei con diverso numero totale di nucleoni A (quindi un diverso numero di neutroni $N = A - Z$). Un difetto od un eccesso di neutroni, rispetto alla combinazione piu' stabile, porta ad un nucleo instabile (radioattivo) che tende a decadere, cioe` a trasformarsi in un nucleo maggiormente stabile.

Nel nostro caso, abbiamo una sorgente di **Sr ($A=90, Z=38$)** con due neutroni in eccesso rispetto allo Stronzio allo stato fondamentale Sr ($A=88, Z=38$). Con un tempo di dimezzamento **$t_{1/2} = 28.5$** anni si trasforma in **Y ($A=90, Z=39$)** attraverso un



L'elettrone emesso ha un'energia massima : **$E_1=546$ keV**.

Il nucleo di Yttrio prodotto e` a sua volta instabile e decade "immediatamente" in Zirconio **Zr ($A=90, Z=40$)** emettendo un elettrone di energia massima **$E_2=2283$ keV**.

Altre sorgenti di calibrazione

Anche se le sorgenti costituiscono un metodo veloce di controllo, non sono semplici da utilizzare in esperimenti con rivelatori grandi e/o dotati di un numero elevato di canali.

In questi casi si preferisce utilizzare:

- eventi di fisica noti dell'esperimento stesso
- fasci di particelle note di energia definita (fasci di test)
- i **raggi cosmici**, fonte naturale e costante di particelle.

I raggi cosmici (I)

La **radiazione cosmica** che incide sulla sommità dell'atmosfera terrestre è costituita da tutte le **particelle cariche stabili** e dai **nuclei atomici** con vite medie > 1 milione di anni. Si definiscono **raggi cosmici primari** le particelle che vengono prodotte ed accelerate localmente da una sorgente astrofisica (per es. una supernova). I **raggi cosmici secondari** sono quelli prodotti dall'urto dei raggi cosmici primari con il gas interstellare (l'insieme delle particelle presenti nello spazio tra le stelle).

I raggi cosmici primari sono prevalentemente: **elettroni, protoni, nuclei di Elio, Carbonio, Ossigeno e Ferro** (che si formano nelle stelle).

Altri nuclei come Litio, Berillio, Boro sono raggi secondari perché non vengono prodotti nelle stelle. Le antiparticelle: anti-elettroni (o positroni) e antiprotoni sono raggi cosmici secondari.

A parte l'attività solare (solar flares), la radiazione cosmica proviene dall'esterno del sistema solare e sull'atmosfera terrestre giunge un **flusso isotropo** di particelle. La radiazione che giunge sull'atmosfera è costituita prevalentemente da nuclei atomici di:

H (protoni): $\sim 10.000/\text{m}^2 \text{ s sr}$ (con energia $> 1 \text{ GeV}$)

He (1/20-esimo) C (1/350) Fe (1/6000)

I raggi cosmici (II)

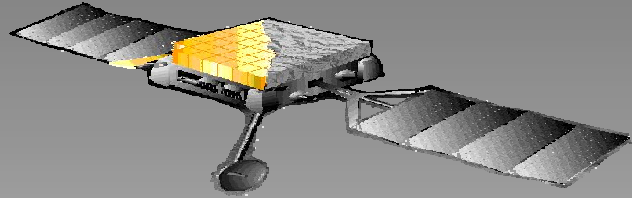
Urtando l'atmosfera terrestre (cioè H,N,O dell'aria), i raggi cosmici producono delle particelle che a loro volta possono interagire o decadere. Se l'energia iniziale è sufficiente si genera un vero e proprio **sciame di particelle** (**Extensive Air Shower**). Al suolo possono arrivare anche milioni di particelle contemporaneamente (prodotte da un'unica particella iniziale) su un'area di alcuni km².

Le particelle cariche più numerose al livello del suolo sono i **muoni** (che sono simili agli elettroni ma con massa pari a circa 200 volte). I muoni possono avere carica positiva μ^+ o negativa μ^- . La maggior parte dei muoni sono prodotti a circa 15 km di quota. La loro energia media al suolo è ~ 4 GeV.

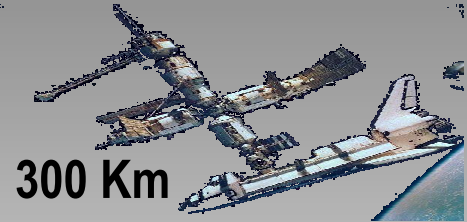
Il flusso totale di muoni al suolo, con energia > 1 GeV è $\sim 70/\text{m}^2 \text{ s sr}$, che corrisponde a:
FLUSSO DI MUONI \sim un muone per cm² al minuto per un rivelatore orizzontale).

Siccome i muoni non contengono quark (sono leptoni), essi non subiscono interazioni nucleari. Perdono energia solo a causa di interazioni "elettromagnetiche". Di conseguenza sono molto penetranti. Quasi tutti i muoni **attraversano il nostro rivelatore senza fermarsi** al suo interno e **perdendo una quantità di energia fissata**, che dipende essenzialmente dal materiale che costituisce il rivelatore e dallo spessore di materiale attraversato.

I raggi cosmici (III)

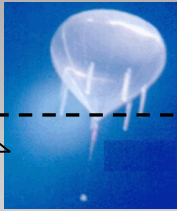


Studio Diretto



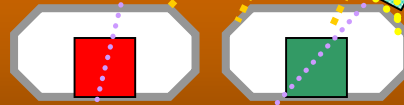
300 Km

40 Km



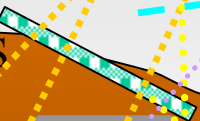
Atmosfera

Studio Indiretto



Rivelatori Sotterranei

EAS



Particelle Secondarie

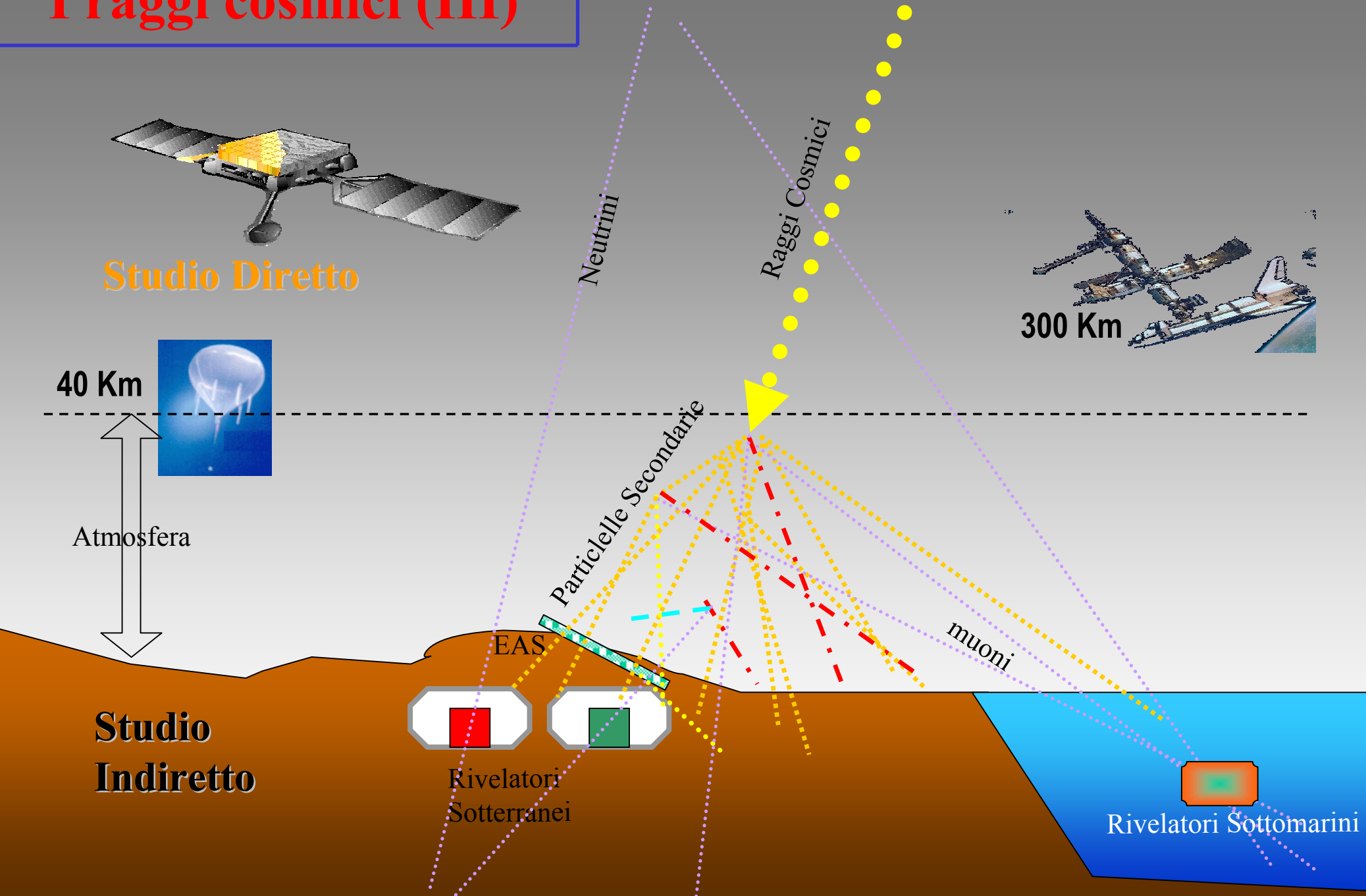
muoni



Rivelatori Sottomarini

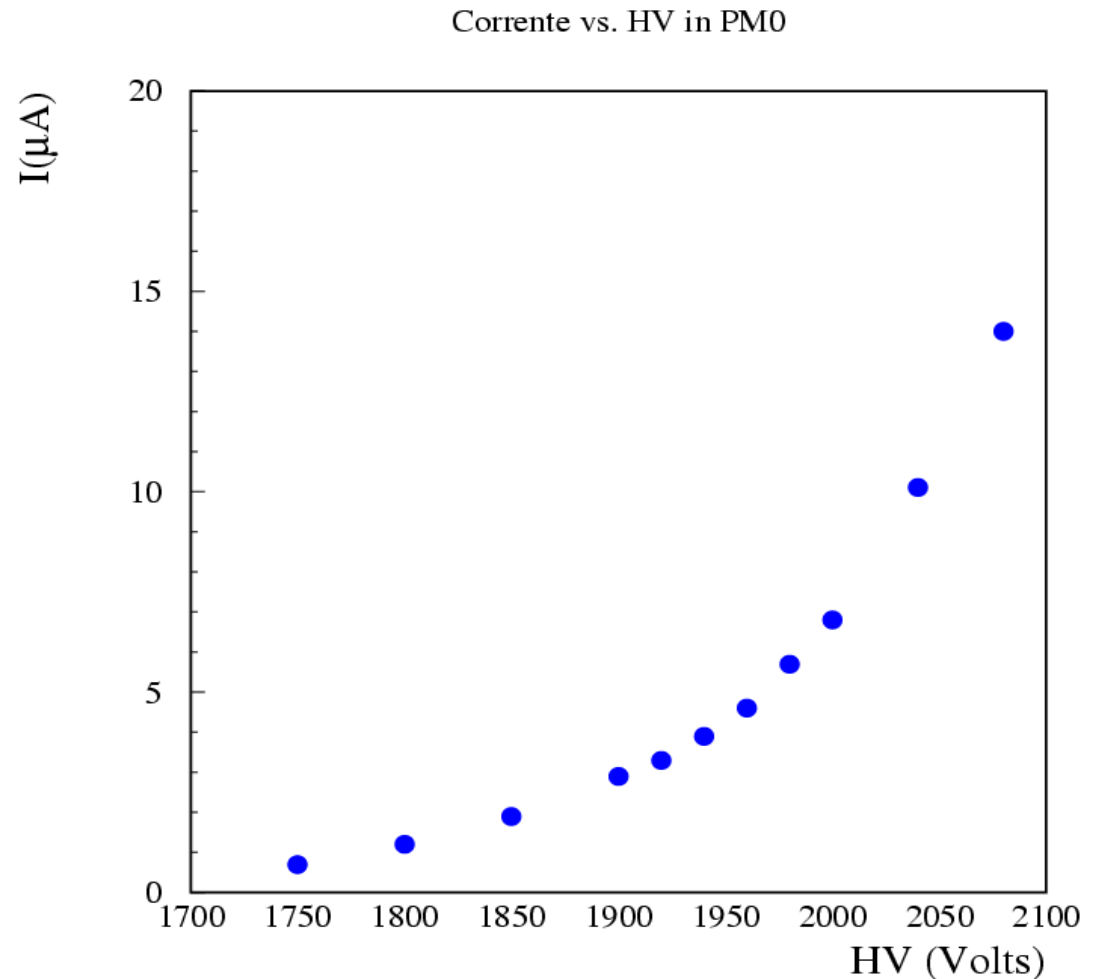
Neutrini

Raggi Cosmici



Curva di guadagno del fotomoltiplicatore (I)

Utilizzando la sorgente radioattiva, posta ad una certa distanza fissata da PM0, possiamo misurare come la corrente nel fotomoltiplicatore dipende dall'alta tensione ad esso applicata.



Curva di Guadagno del PMT

Curva di guadagno del fotomoltiplicatore (II)

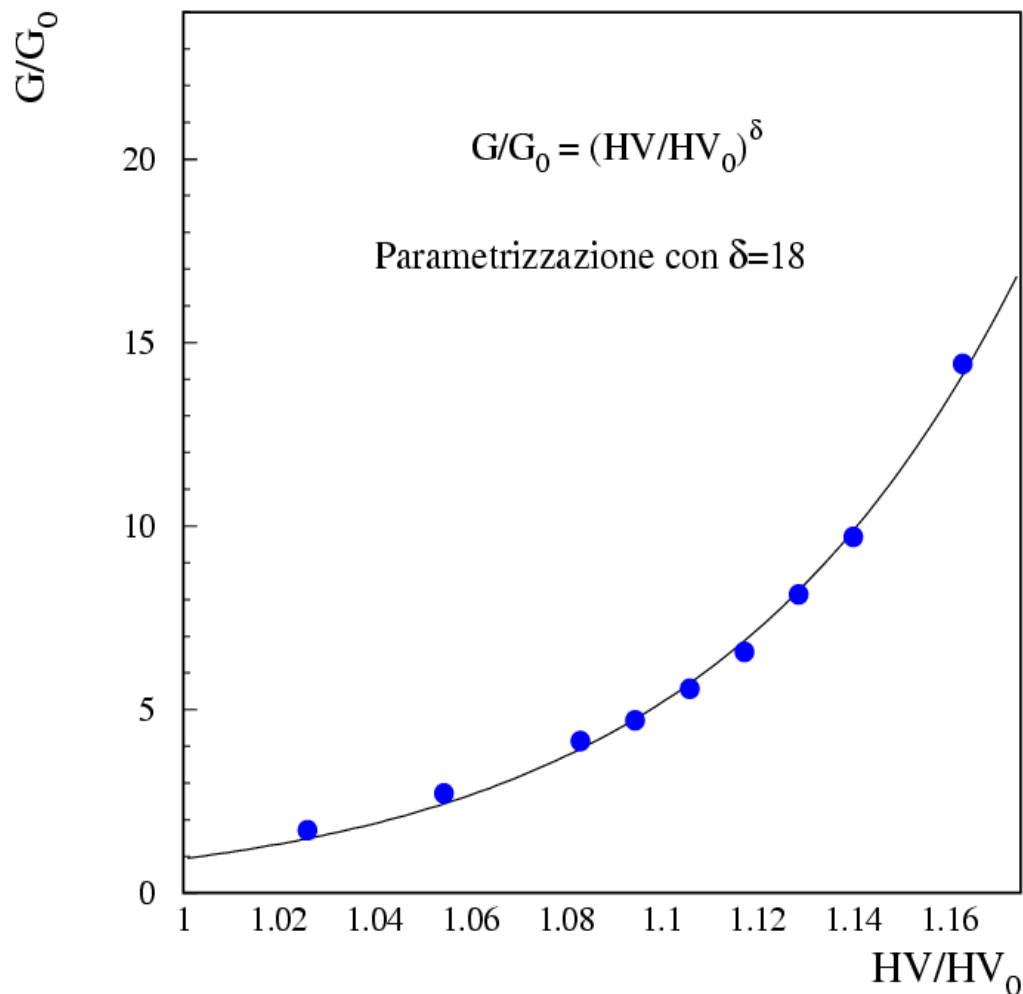
Se indichiamo con δ il numero di dinodi e con K il coefficiente di moltiplicazione per emissione secondaria, il guadagno del fotomoltiplicatore e' K^δ ($10^5 \div 10^6$).

Siccome K e' proporzionale all'alta tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore HV , se chiamiamo G_0 il guadagno alla tensione HV_0 , allora il guadagno G alla tensione HV soddisfa la relazione:

$$G/G_0 = (HV/HV_0)^\delta$$

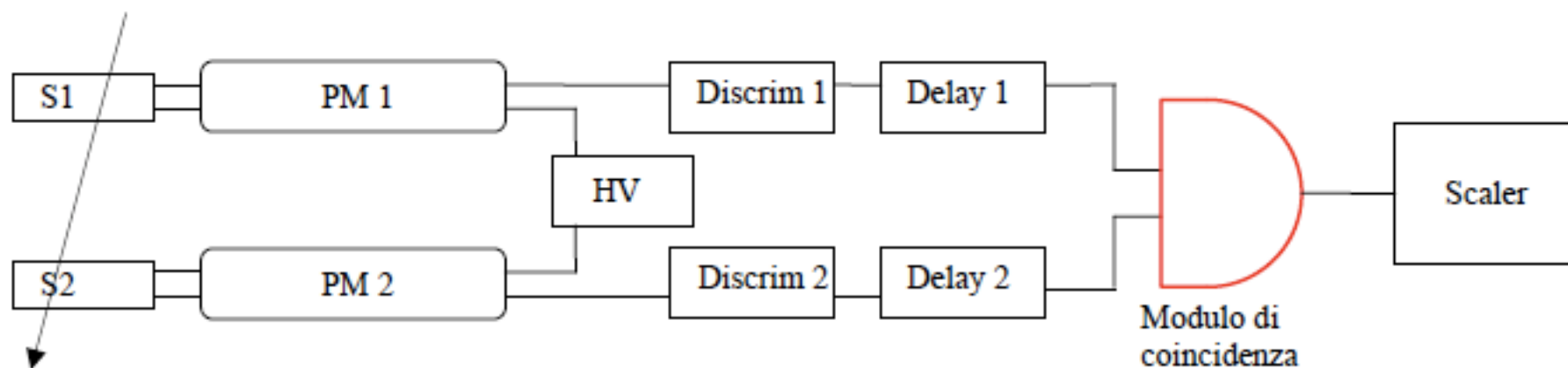
ed essendo $G \propto i$ (corrente nel PM), il rapporto dei guadagni e' uguale al rapporto delle correnti:

$$G/G_0 = i/i_0$$



Misura delle rate al variare dell'accettanza

Rivelatori a Scintillazione



Questo e' lo schema base dell'esperimento che vogliamo realizzare.

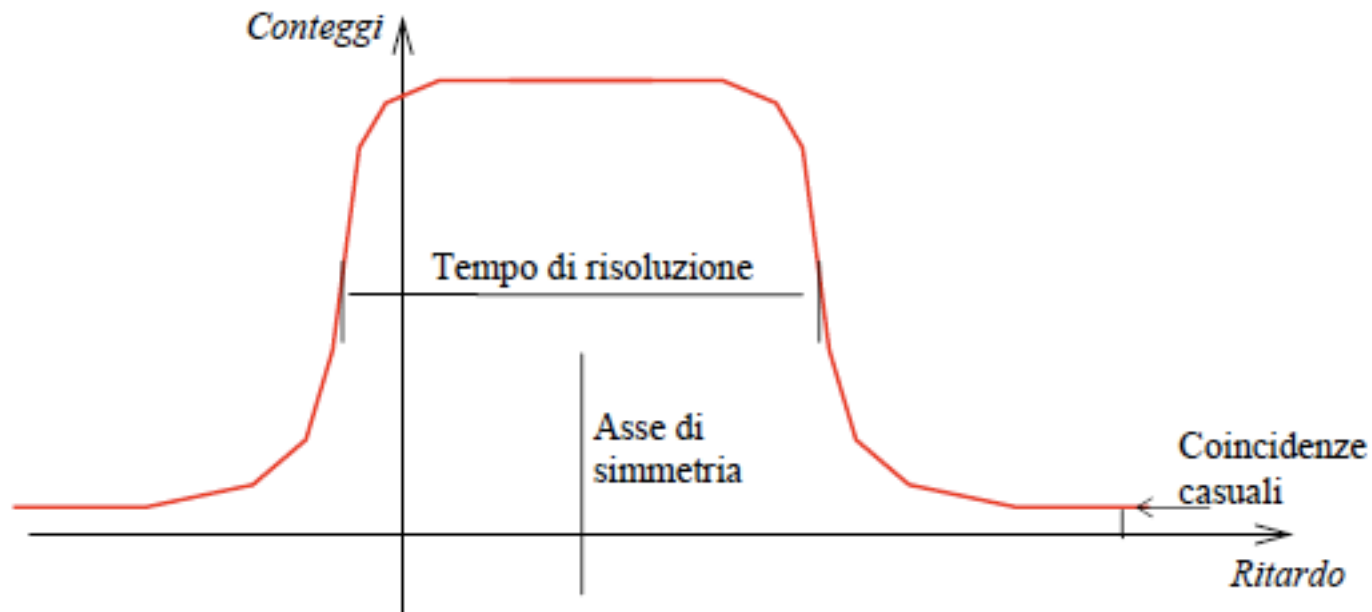
Abbiamo a disposizione 2 scintillatori gia' connessi con PMT e nell'esperienza precedente abbiamo misurato le curve di guadagno.

Rivelatori a Scintillazione

Per ottimizzare la coincidenza tra i due scintillatori e' importante studiare i ritardi da dare a ciascun canale affinche' l'efficienza di rivelazione sia massima.

Tenendo fisso il primo ritardo, dobbiamo variare il secondo e conteggiare mediante lo scaler le coincidenze che vengono misurate.

Con i dati ricavati si ottiene una curva di questo tipo:



Rivelatori a Scintillazione

Se modifichiamo la geometria del sistema disallineando gli scintillatori uno rispetto all'altro, ci accorgiamo che il numero di conteggi misurati allo scaler diminuisce molto rapidamente.

Da queste informazioni e' possibile ricavare una distribuzione angolare dei raggi cosmici che attraversano il nostro sistema.

Rivelatori a Scintillazione

Analogamente, se avviciniamo o allontaniamo gli scintillatori l'uno rispetto all'altro, vediamo che anche in questo caso il numero di conteggi misurati allo scaler varia in base a come ci spostiamo.

- Perché?
- Quale informazioni possiamo ricavare da questa misura?
- Sappiamo rappresentare graficamente questo andamento e ricavare una legge di natura?