

Interazione radiazione materia - rivelatori &

Attività: Caratterizzare un PMT

Riccardo Biondi



PID-LNGS: Programma INFN per Docenti, 8-12 Aprile 2024

Concetti e Definizioni preliminari

- Elettronvolt: $eV = 1.602 \cdot 10^{-19} J$ (unità di misura di tutto)
- Energia [eV] - Impulso [eV/c] - Massa [eV/c²] con $c = 299792458$ m/s
- $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ Con: $p = mv$ (quantità di moto o impulso)
- $\beta = v/c = p c/E$ (velocità rispetto alla velocità della luce)
- $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2} = E/mc^2$ (fattore di dilatazione relativistico)
- $\beta\gamma = p/mc$

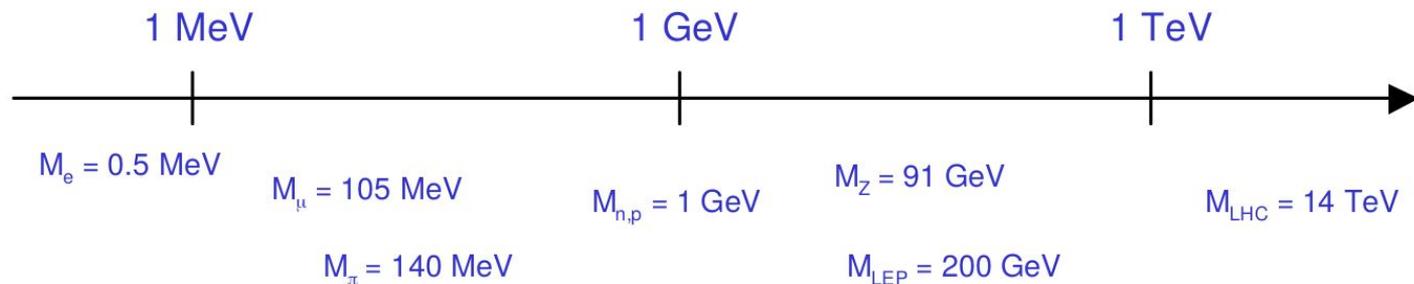
Sezione d'urto: Se, $P(x)$ è la probabilità che una certa particella, attraversando uno spessore x di un certo materiale non abbia interagito.

Cammino libero medio: distanza media tra un'interazione e la successiva:

$$\lambda = \frac{\int x P(x) dx}{\int P(x) dx} = \frac{1}{\rho\sigma}$$

Dove σ ha le unità di misura di una superficie ed è detta Sezione d'urto.

Alcuni numeri di riferimento



Valori tipici di lunghezze

- 1 μm (10^{-6} m) risoluzione spaziale dei rivelatori
- 1 nm (10^{-9} m) lunghezza d'onda della luce verde 500 nm
- 1 Å (10^{-10} m) dimensione dell'atomo
- 1 fm (10^{-15} m) dimensione del protone

Valori tipici di tempo

- 1 μs (10^{-6} s) tempo di deriva di un elettrone in 5 cm di Ar
- 1 ns (10^{-9} s) un elettrone relativistico percorre 30 cm
- 1 ps (10^{-12} s) vita media di un mesone B

Interazione radiazione materia

Cosa si intende per “radiazione”?

Particelle elementari (e non) in grado di **interagire**, e quindi modificare lo stato di un **rivelatore**

Particelle:

- Particelle cariche
- Elettroni
- Fotoni
- Adroni
- Neutroni

Interazioni:

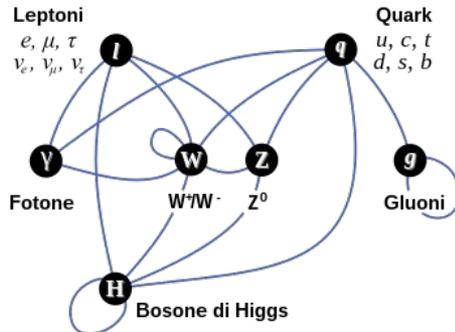
- Nucleare Forte
- Elettromagnetica
- Nucleare Debole
- Gravità (trascurabile)

Rivelatore: Qualsiasi materiale in grado di produrre un segnale misurabile quando viene attraversato da una particella.

Particelle Elementari

Il **“Modello Standard”** è la teoria che descrive il comportamento delle particelle elementari:

- Combina Meccanica Quantistica e Relatività speciale (oggetti piccoli e veloci)
- Solo tre delle quattro interazioni fondamentali (la Gravità è irrilevante)



Due particelle che interagiscono modificano reciprocamente il loro stato (Energia, Spin, Direzione del moto...)

Misurando queste “osservabili” delle particelle, prima e dopo l’interazione, possiamo capirne le proprietà!

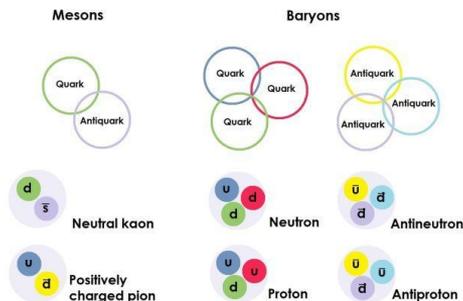
Standard Model of Elementary Particles

| | three generations of matter (elementary fermions) | | | three generations of antimatter (elementary antifermions) | | | interactions / force carriers (elementary bosons) | |
|--------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | I | II | III | I | II | III | | |
| mass | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | 0 | 0 |
| spin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 |
| | u up | c charm | t top | \bar{u} antiup | \bar{c} anticharm | \bar{t} antitop | g gluon | H higgs |
| | d down | s strange | b bottom | \bar{d} antidown | \bar{s} antistrange | \bar{b} antibottom | γ photon | |
| | e electron | μ muon | τ tau | e^+ positron | $\bar{\mu}$ antimuon | $\bar{\tau}$ antitau | Z Z^0 boson | |
| | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | $\bar{\nu}_e$ electron antineutrino | $\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino | $\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino | W^+ W^+ boson | W^- W^- boson |

QUARKS LEPTONS GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS SCALAR BOSONS

Quali particelle posso usare?

Hadrons



Adronizzazione

Standard Model of Elementary Particles

| | three generations of matter (elementary fermions) | | | three generations of antimatter (elementary antifermions) | | | interactions / force carriers (elementary bosons) | | |
|----------------|---|--------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------|----------------------------------|
| | I | II | III | I | II | III | | | |
| mass | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | 0 | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ | 0 | 0 | 0 |
| spin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | 1 | 0 |
| QUARKS | u up | c charm | t top | \bar{u} antiup | \bar{c} anticharm | \bar{t} antitop | g gluon | γ photon | H higgs |
| | d down | s strange | b bottom | \bar{d} antidown | \bar{s} antistrange | \bar{b} antibottom | | | |
| | e electron | μ muon | τ tau | e^+ positron | $\bar{\mu}$ antimuon | $\bar{\tau}$ antitau | Z^0 boson | Z^0 boson | Z^0 boson |
| LEPTONS | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | $\bar{\nu}_e$ electron antineutrino | $\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino | $\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino | W^+ boson | W^+ boson | W^+ boson |
| | | | | | | | W^- boson | W^- boson | W^- boson |

Ce ne sono centinaia ma la maggior parte decade in tempi brevissimi in particelle più leggere

Bassa probabilità di interazione: posso rivelare solo la particella contro cui urtano

Instabili:
Decadono
velocemente

Quindi intendiamo:

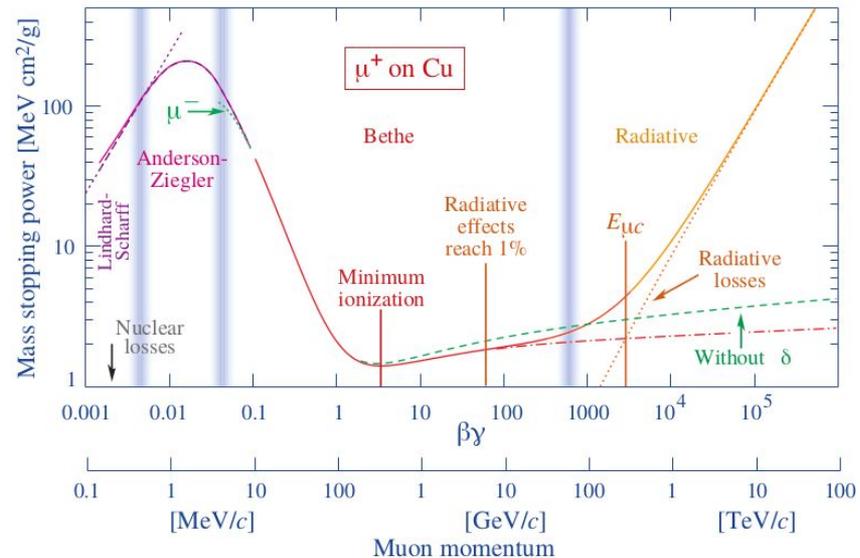
- Mesoni (K, π , ...)
- Barioni (p, n, ...)
- Muoni

Per l'elettrone va fatto un discorso a parte

$$\text{Mass stopping power: } - \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

(spessore di massa)

[Calcolatore Online](#)

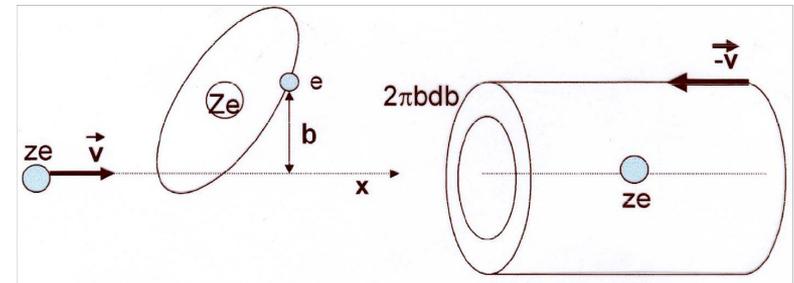
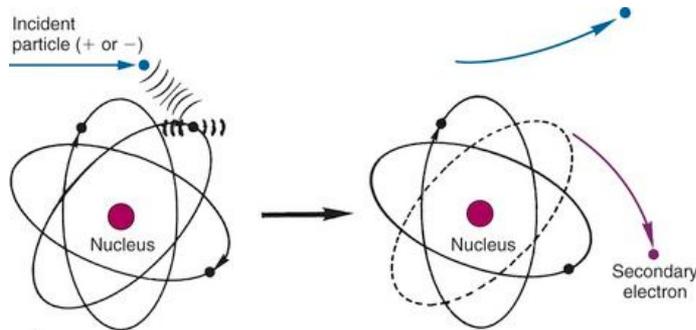
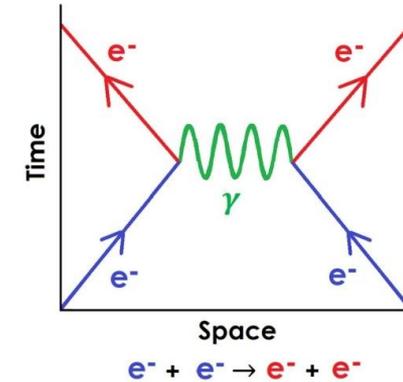


Tre tipi di interazioni possibili:

1. Interazione con elettroni atomici
2. Fenomeno di Bremsstrahlung
3. Effetto Cherenkov

Interazione elettromagnetica con grande sezione d'urto.

- Eccitazione elettronica
- Ionizzazione (con energia sufficiente ad estrarre l'elettrone)
- Knock-out (se l'elettrone ionizzato riesce a ionizzare a sua volta)

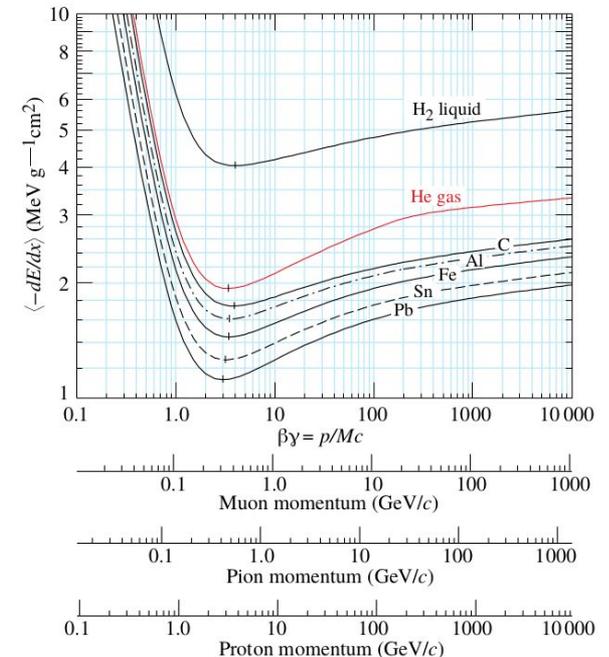


Formula di Bethe-Bloch

Può essere considerato un processo continuo, si studia la perdita di energia per unità di percorso, data dalla: **Formula di Bethe-Bloch**

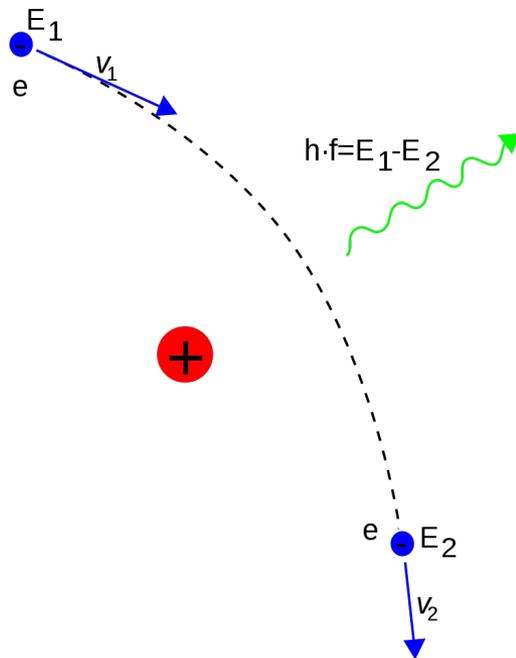
$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = C \frac{z^2}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right) \text{ MeV gr}^{-1} \text{ cm}^2$$

- Dipende come Z/A ; ma $Z/A \sim 1/2$ per quasi tutti i materiali (tranne l'idrogeno) , quindi la perdita di energia è **indipendente dal materiale**.
- Per piccoli valori di β , la perdita di energia va come $1/\beta^2$, per poi passare per un minimo e risalire in maniera logaritmica quando $\beta\gamma = p/Mc > 1$ (risalita relativistica) per poi tendere ad un valore costante;
- La perdita di energia al minimo vale **$\sim 1 - 2 \text{ MeV gr}^{-1} \text{ cm}^2$**
Minimum Ionizing Particles (MIP)



Fenomeno di Bremsstrahlung

Quando una particella carica passa nelle vicinanze di un nucleo atomico, viene deflessa dalla forza coulombiana dello stesso. L'accelerazione che una particella carica subisce nel momento della deflessione provoca l'**emissione di radiazione elettromagnetica**.



L'accelerazione sarà tanto maggiore quanto minore sarà la massa della particella, per cui la perdita di energia per irraggiamento è proporzionale all'energia:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{rad} \simeq \frac{E}{X_0} \simeq 4r_e^2 \alpha \frac{N_A Z^2 \rho}{A} \ln(183Z^{-1/3}) E$$

Lunghezza di radiazione X_0 : la distanza alla quale l'energia dell'elettrone si riduce di un fattore 1/e per effetto delle sole perdite per radiazione.

Una particella carica che viaggia in un mezzo con una **velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo** emette una radiazione luminosa detta luce Cherenkov.

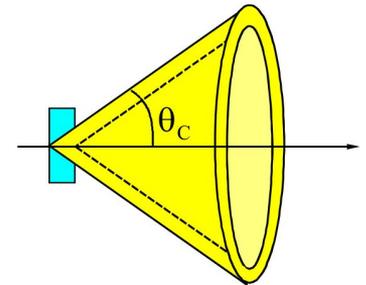
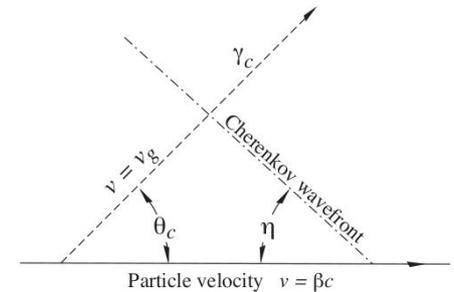
Il passaggio della carica nel mezzo genera effetti di polarizzazione e depolarizzazione, ciò genera una serie di onde sferiche il cui inviluppo costituisce un fronte d'onda conico il cui angolo di emissione θ_C è:

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n}$$

L'effetto Cherenkov ha una **soglia data da $\beta_{th} = 1/n$** e permette quindi di selezionare particelle sopra tale soglia.

Viene utilizzato per individuare quella classe di particelle di dato impulso p in grado di emettere luce in un mezzo di indice di rifrazione n . Quindi particelle con una massa tale che:

$$mc^2 < pc\sqrt{n^2 - 1}$$

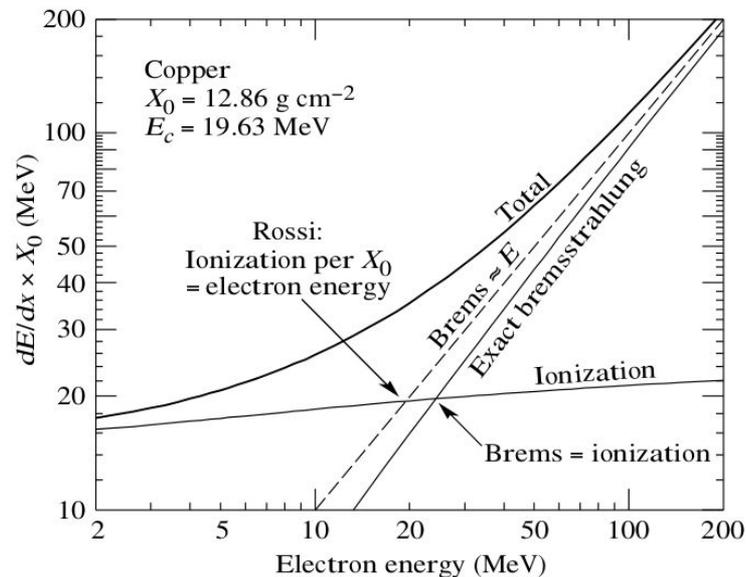


La formula di Bethe-Block deve essere modificata per tener conto dell'identità tra il proiettile ed il bersaglio.

Inoltre, la perdita di energia per Bremsstrahlung è molto maggiore per gli elettroni

Per un certo valore di E le perdite per ionizzazione eguagliano quelle per radiazione prende il nome di **energia critica: $E_c \sim 600/Z$ MeV**

Il corrispondente valore per particelle pesanti è molto maggiore, per cui queste perdite di energia sono trascurabili con l'eccezione dei muoni di alta energia.

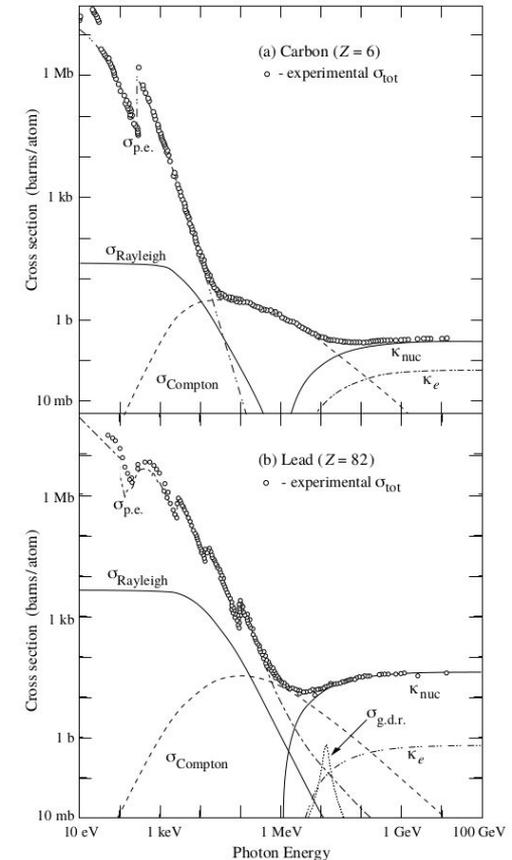
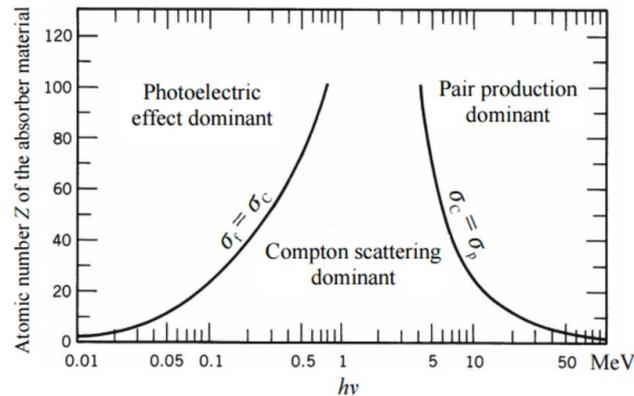


Interazione di Fotoni

La radiazione elettromagnetica può convertire parte o tutta la sua energia per interazione con gli atomi e i nuclei atomici attraverso i seguenti processi:

1. Effetto Fotoelettrico
2. Effetto Compton
3. Produzione di coppie elettrone-positrone

L'energia a cui un processo diventa dominante sugli altri due cambia a seconda del materiale



Effetto Fotoelettrico

La prima dimostrazione sperimentale della natura corpuscolare della luce, che risulta costituita da quanti di energia $E_\gamma = h\nu$.

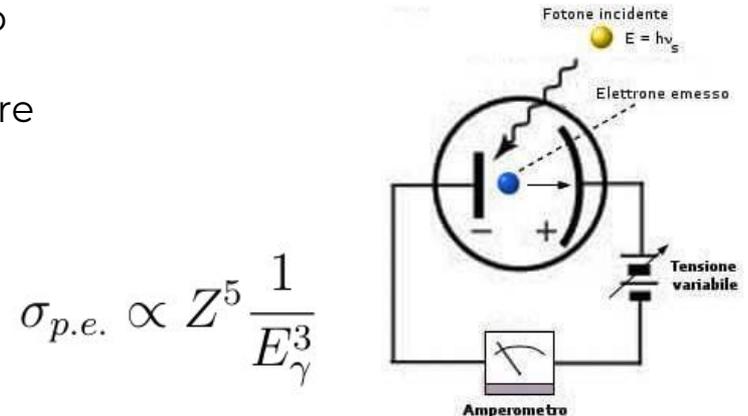
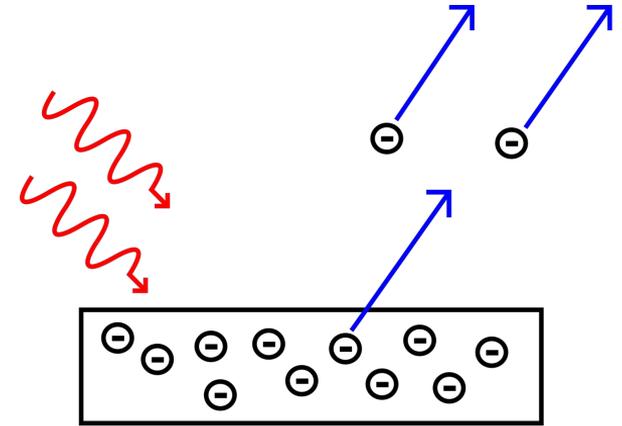
$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

L'effetto fotoelettrico può essere interpretato come una reazione

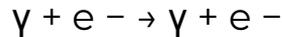


La conservazione dell'energia e della quantità di moto richiedono **la presenza di un nucleo pesante** che assorba impulso senza assorbire energia per consentire il fenomeno

L'effetto fotoelettrico richiede che l'energia del fotone sia maggiore dell'energia di legame dell'elettrone.



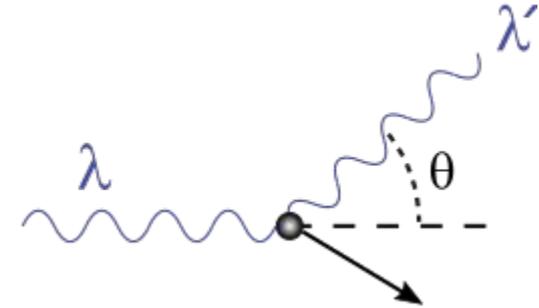
Per energie molto maggiori dell'energia di legame, gli elettroni si possono considerare liberi e possono interagire con i fotoni tramite il **processo elastico**:



L'elettrone assorbe parte dell'energia del fotone incidente, che varia quindi la sua frequenza.

$$h\nu - h\nu' = \frac{h^2\nu\nu'}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta) \rightarrow \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \vartheta)$$

Indipendente dall'energia del fotone incidente e dal mezzo. Tuttavia, il fotone deve avere energia almeno dell'ordine di $m_e c^2$ per subire una variazione di lunghezza d'onda apprezzabile



$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta)}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_\gamma} = \frac{1}{2} r_e^2 \frac{Z}{A} \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \left(1 + \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \sin^2 \vartheta_\gamma \right)$$

La sezione d'urto totale, va come $1/E_\gamma$ per $E_\gamma > m_e c^2$

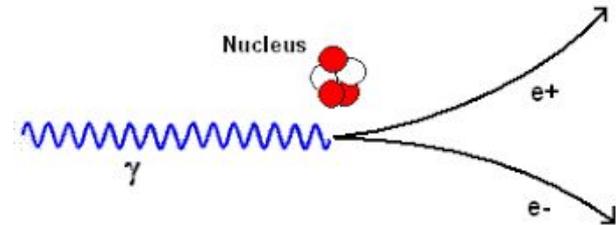
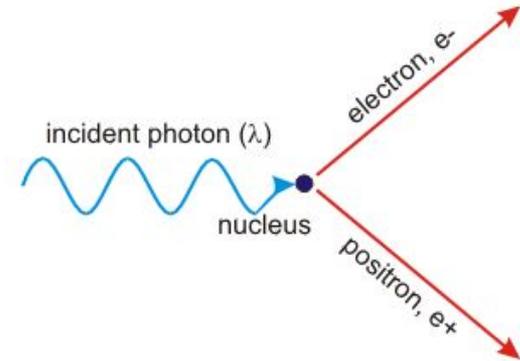
Produzione di coppie elettrone-positrone

Quando $E_\gamma > 2 m_e c^2$, per il fotone si apre la soglia per la produzione di coppie elettrone-positrone.

La creazione di coppie **non può avvenire nel vuoto**, per la differenza tra la massa invariante iniziale (che deve essere nulla) e dello stato finale che contiene i due elettroni, la produzione deve avvenire in presenza di un nucleo che assorba l'impulso in eccesso.

Ad alte energie, la sezione d'urto è proporzionale a $Z^2 \ln 183/Z^{1/3}$, e può quindi essere scritta come:

$$\sigma_{coppie} \simeq \frac{7}{9} \frac{1}{X_0} \frac{A}{\rho N_A}$$



Cascate Elettromagnetiche

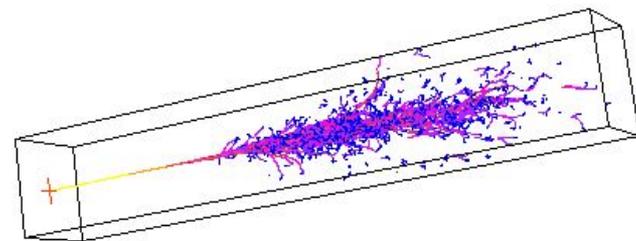
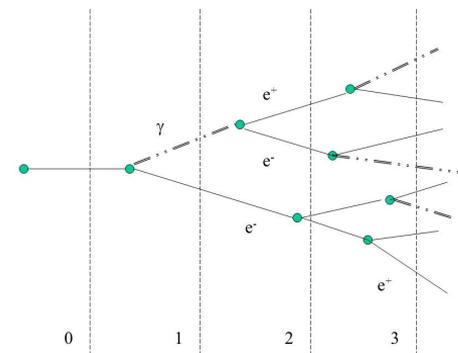
Con $E \sim 10$ GeV i processi dominanti nell'interazione di elettroni e fotoni con la materia sono l'**irraggiamento** e la **produzione di coppie**.

Entrambi regolati dalla scala di lunghezza X_0 : il percorso medio tra un processo moltiplicativo e il successivo sarà $\sim X_0$.

I prodotti di tali processi avranno energie decrescenti al crescere del numero delle generazioni.

Quando gli elettroni ridurranno la loro energia al di sotto dell'**energia critica**, diventeranno dominanti le perdite di energia per ionizzazione, e la cascata si arresterà.

Lo sviluppo laterale dello sciame, risulta indipendente dall'energia incidente e può essere quantificato dal raggio di Molière, definito come il raggio di un cilindro che contiene il 90% dell'energia dello sciame e che vale $R_M \sim 21 X_0 / E_c (\text{MeV})$.

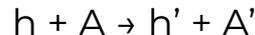


Gli adroni: sono soggetti anche all'interazione forte:

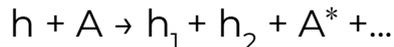
| J | Particles (mass in MeV) |
|---------------|--|
| 0 | π^0 (135), π^\pm (140), η (547), η' (958), K^\pm (494), K^0, \bar{K}^0 (498) |
| 1 | $\rho^{\pm,0}$ (771), ω (783), $K^{*\pm}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}$ (892), Φ (1020) |
| $\frac{1}{2}$ | p (938), n (939), Λ (1116), $\Sigma^{\pm,0}$ (1193), $\Xi^{0,-}$ (1318) |
| $\frac{3}{2}$ | $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^-, \Delta^0$ (1232), $\Sigma^{*\pm,0}$ (1385), $\Xi^{*\pm,0}$ (1318), Ω^- (1672) |

Tale interazione può avvenire con nuclei ($E < \text{GeV}$) e con nucleoni ($E > \text{GeV}$).

Scattering elastico: l'interazione non cambia la natura delle particelle:



Scattering anelastico: si creano altri adroni e il nucleo viene eccitato, la diseccitazione può avvenire con emissione di fotoni, frammentazione ecc. :



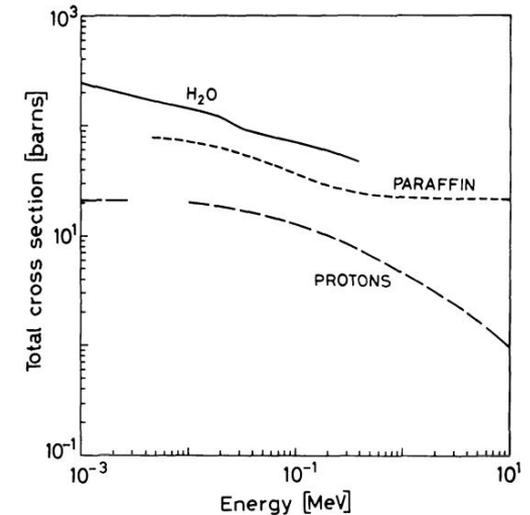
Anche gli adroni danno luogo a moltiplicazioni in cascata, che prendono il nome di **sciami adronici** che hanno anche una componente elettromagnetica.

Interazioni di Neutroni

Essendo privi di carica elettrica, interagiscono principalmente attraverso l'interazione forte:

A seconda della loro energia, i neutroni hanno dei comportamenti specifici:

- **$E < \text{eV}$** : Fissione Nucleare
- **$\text{eV} < E < \text{KeV}$** : Reazioni nucleari con emissione di particelle cariche
- **$E < \text{MeV}$** : Cattura Neutronica radiativa $n + (Z,A) \rightarrow \gamma + (Z,A+1)$
- **$E \sim 1 \text{ MeV}$** : Scattering anelastico
- **$E \sim \text{few MeV}$** : Scattering elastico con Nuclei
- **$E > 100 \text{ MeV}$** : Sciami Adronici

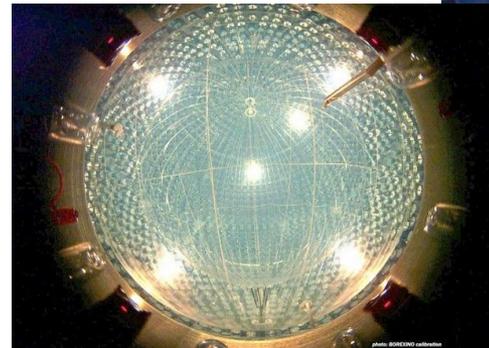


Rivelatori

I rivelatori di particelle sono strumenti elettro-meccanici in grado di misurare i deboli segnali prodotti dalle particelle.

Caratteristiche:

- **Sensitività:** capacità di produrre un segnale per un certo tipo di radiazione ad una certa energia
- **Funzione di Risposta:** relazione tra l'energia depositata dalla particella e il segnale prodotto
- **Risoluzione Energetica:** capacità di distinguere eventi di energia diversa $\Delta E/E$
- **Efficienza:** frazione di eventi rivelati rispetto a quelli prodotti dalla sorgente
- **Dead Time:** tempo in cui il rivelatore elabora un segnale, e quindi è cieco verso nuovi segnali in arrivo.



Qualsiasi materiale (organico o inorganico), in grado di **convertire l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile** e trasportarla verso un apparecchio in grado di convertirla in un segnale elettrico.

Atomi o molecole vengono eccitati dal rilascio di energia dovuto al passaggio di radiazione ionizzante.

Quando si diseccitano emettono luce nello spettro visibile.

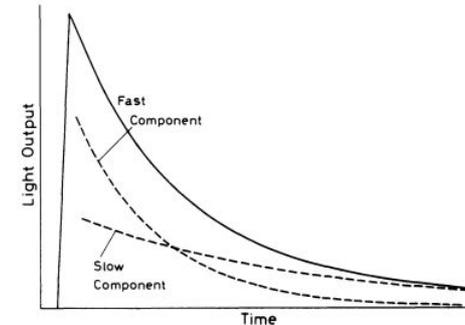


Fig. 7.3. Resolving scintillation light into *fast* (prompt) and *slow* (delayed) components. The *solid line* represents the total light decay curve

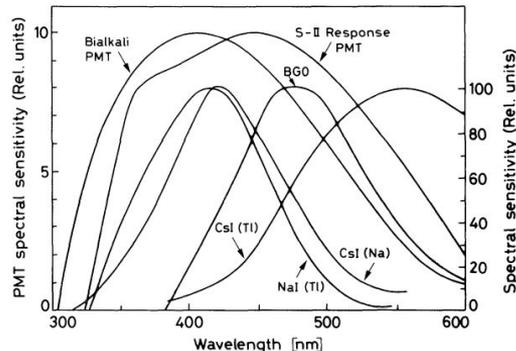
- Risposta **lineare con l'energia** depositata
- Basso “dead time”: permette informazioni temporali sugli eventi osservati.
- Pulse Shape Discrimination: è possibile distinguere il **tipo di particella** interagente dalla forma dell'impulso prodotto, questo perché, particelle con diverso potere ionizzante, eccitano diversi meccanismi di fluorescenza

Inorganici Vs Organici

Inorganici: cristalli ionici drogati con impurità (NaI, CsI, BGO, BaF₂ ...).

Hanno una migliore risposta luminosa che varia con la temperatura, Ma sono più lenti (~ 100 ns)

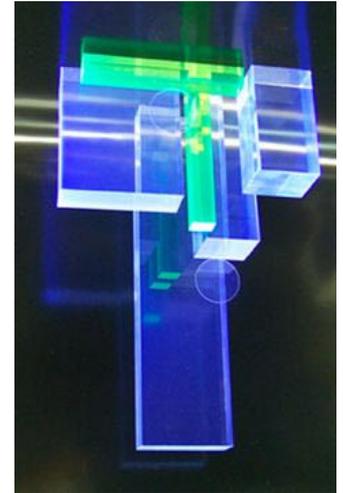
Il materiale materiale più efficiente è NaI con 40.000 p.e./MeV.



Organici: complesse molecole organiche che emettono luce nell’ultravioletto in seguito all’eccitazione di livelli vibrazionali molecolari. Si aggiungono sostanze “wave-length shifter” per trasportare l’emissione nel visibile.

Hanno una risposta peggiore di quelli inorganici, ma sono più veloci (< 10 ns).

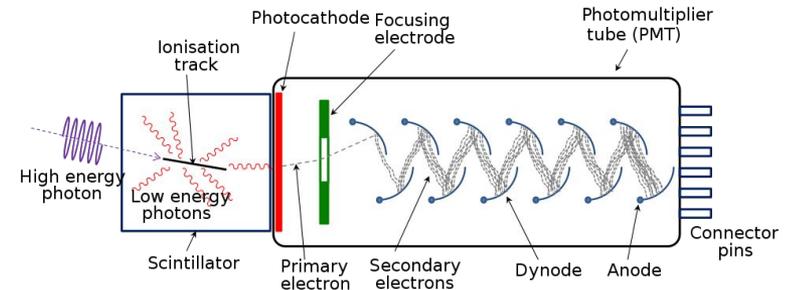
Possono essere prodotti facilmente e in grosse quantità e svariate dimensioni



Fotomoltiplicatori

La debole luce prodotta (in generale qualche centinaio di fotoni) negli scintillatori dovrà poi essere trasformata in un segnale elettrico in grado di essere misurato ed acquisito. In generale il compito di questa trasformazione è svolto da fotomoltiplicatori.

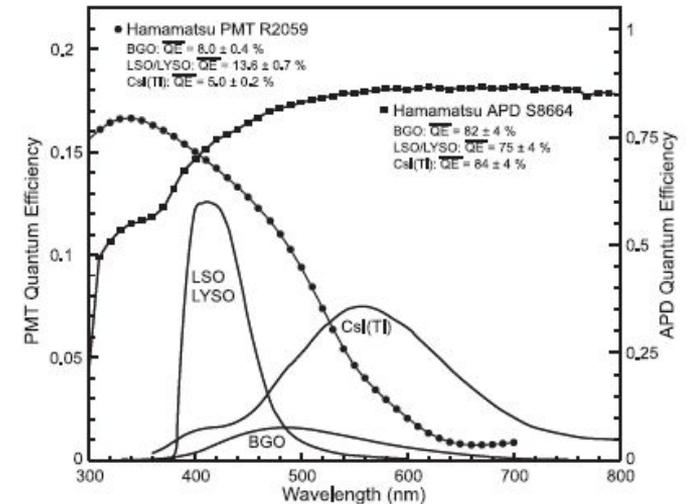
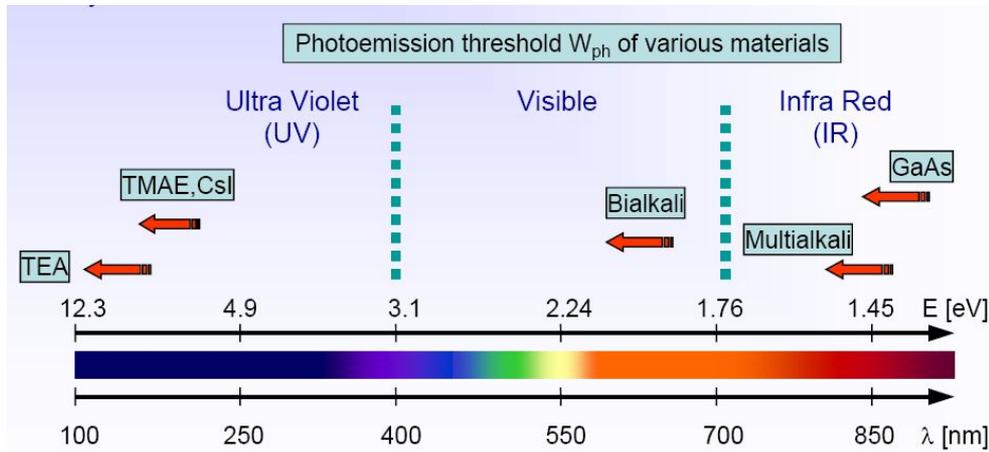
1. I fotoni vengono “trasformati” in elettroni mediante **effetto fotoelettrico** sul fotocatodo
2. Gli elettroni accelerati vengono utilizzati per estrarre elettroni secondari
3. Con un meccanismo a valanga il numero di elettroni aumenta enormemente (10^6)
4. Gli elettroni raccolti danno il segnale elettrico



- Il fotocatodo è realizzato da un metallo alcalino spalmato su una finestra di vetro trasparente ai fotoni.
- L'energia minima che consente al fotone di generare un fotoelettrone (lavoro di estrazione) è dell'ordine ~ 30 eV.
- L'energia dovuta all'agitazione termica ($\sim kT$) è dell'ordine di 0,025 eV. La probabilità di emissione spontanea di elettroni è dell'ordine di 100 Hz/m^2 .

Efficienza quantica:

Si definisce efficienza quantica (QE) il rapporto: n emessi/ n incidenti. Dipende dalla lunghezza d'onda ed al massimo vale 20-30%.



Moltiplicazione degli Elettroni

Gli elettroni uscenti dal fotocatodo sono accelerati con campi elettrici e mandati ad urtare la superficie di un elettrodo detto **dinodo** (ossidi di berillio o manganese).

Il passaggio di questo elettrone primario eccita gli elettroni del materiale che ricevono energia sufficiente per essere emessi con un'energia cinetica di ~ 1 eV.

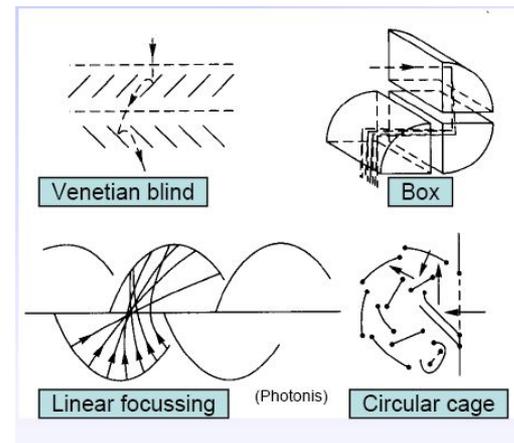
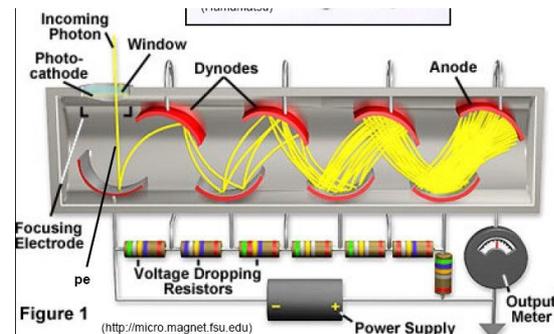
L'energia necessaria per l'estrazione è circa 23 eV.

Un elettrone primario accelerato da una ddp di 100 V è quindi in grado di produrre circa 30 secondari. Solo una frazione piccola ($\delta \sim 20\text{-}30\%$) riesce però ad uscire.

Dunque per ottenere elevati guadagni vengono utilizzati diversi N dinodi in cascata ottenendo un guadagno totale:

$$G = \alpha \delta^N$$

α : frazione di fotoelettroni catturati dal primo dinodo (~ 1)



Anche in condizione di assenza di luce, all'uscita del fotomoltiplicatore è presente una piccola corrente, che è chiamata dark current o dark noise e può avere diverse origini

- **Emissione termoionica:** I materiali superficiali del fotocatodo e dei dinodi emettono elettroni per effetto termico.
- **Leakage current:** piccole correnti (fino al nA) che scorrono attraverso i supporti degli elettrodi, o attraverso l'involucro o la base del fototubo, o qualsiasi altro isolante.
- **Ionizzazione di gas:** gas residui all'interno del PMT nonostante vengono ionizzati dalle collisioni con gli elettroni.
- **Effetti di campo:** quando il campo elettrico tra i dinodi diventa abbastanza grande, un numero non trascurabile di elettroni viene emesso.
- **Radiazione Ambientale:** Raggi cosmici, radiazioni da radioisotopi contenuti negli involucri di vetro e
 - Muoni $1 \text{ muone/cm}^2/\text{min}$ → rilasciano per effetto Cherenkov un alto numero di elettroni (più di 15 fotoelettroni), generando impulsi di grande ampiezza.
 - ^{40}K nei vetri dei PMT
 - Gamma ambientali

Rivelatori a Gas

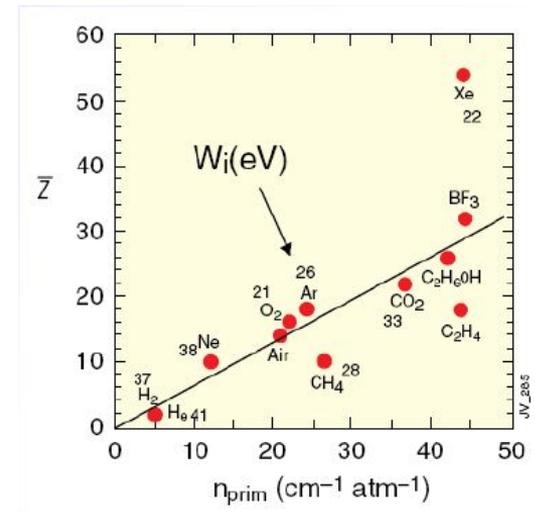
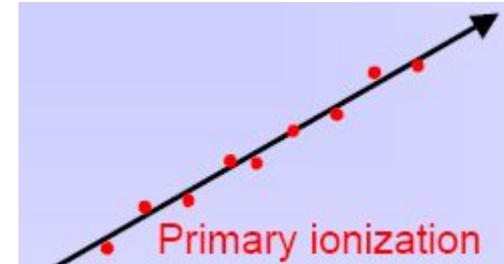
Una particella carica che attraversa il gas lascia dietro di sé una scia di **atomi ionizzati**.

Il numero di ionizzazioni dopo un cammino L , ha distribuzione poissoniana attorno al valore medio $n=L/\lambda$.

Il numero di ionizzazioni al cm cresce con la Z del gas: vale 5 per l'idrogeno e l'elio, 20 per azoto, ossigeno ed aria e 30 per l'argon (a pressione atmosferica)

n_{prim} è linearmente proporzionale alla densità del gas

In media si può assumere che l'energia necessaria alla creazione di una coppia (elettrone - ione) sia di ~ 30 eV



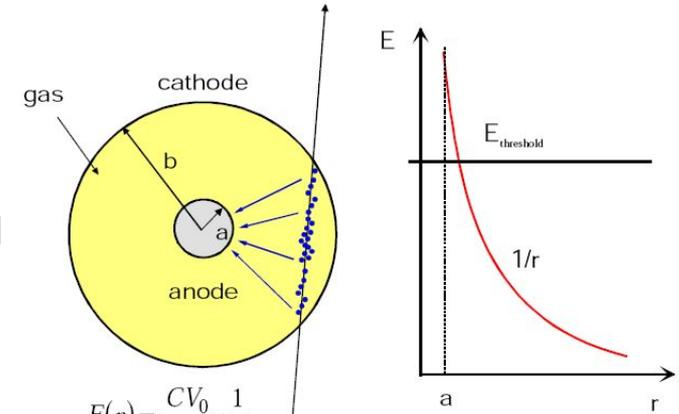
Il filo proporzionale

Il più semplice rivelatore a gas è costituito da un **condensatore cilindrico** riempito di gas:

Gli elettroni liberati dal passaggio della radiazione si muoveranno radialmente, e ionizzando altre molecole del gas. Dando luogo ad un processo di moltiplicazione a valanga.

Il numero di elettroni secondari prodotti in fondo alla valanga e raccolti sul filo è determinato dal numero di generazioni e dal numero di elettroni prodotti in ognuna. Tali parametri sono legati alla geometria e configurazione elettrica del sistema alle caratteristiche del gas.

Fissate queste condizioni il numero di elettroni secondari sarà **proporzionale al numero di elettroni primari** prodotti.

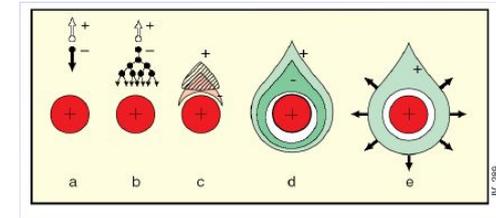


$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

C = capacitance / unit length

$$E \sim 10^4 \text{ V/cm}$$

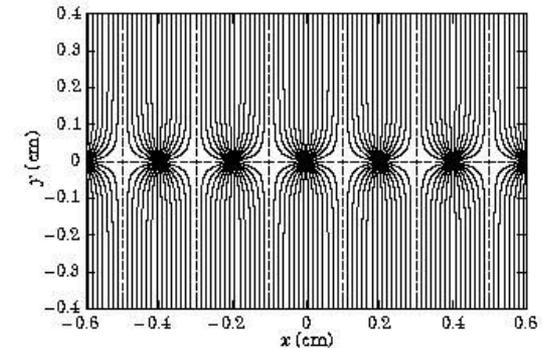
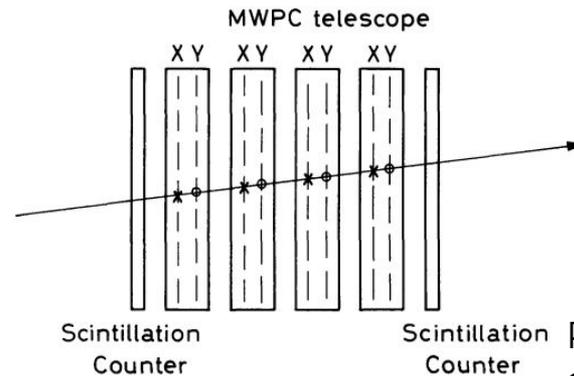
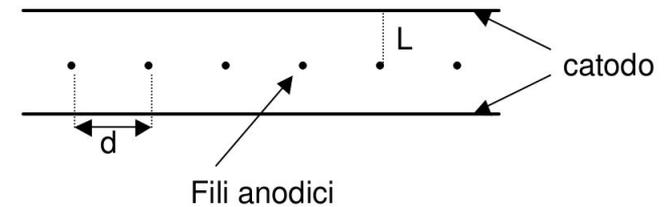


MultiWire Proportional Chambers

Il campo elettrico generato è costante ovunque, tranne vicino ai fili dove assume un andamento $\sim 1/r$.

Quando gli elettroni sono liberati nella regione a campo costante, si muovono **seguendo le linee di campo** fino all'anodo più vicino, raggiungendo così la regione di campo forte e producendo la valanga.

I fili vicini sono comunque influenzati dal passaggio di radiazione, ma in modo minore, quindi si può sempre ricostruire quale filo è il più vicino all'evento.

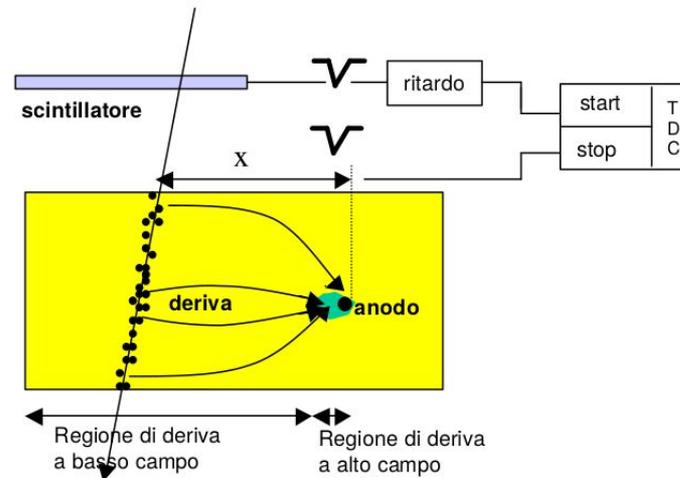
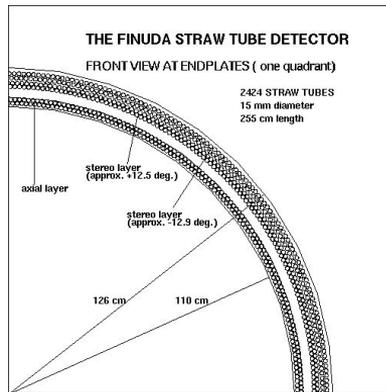
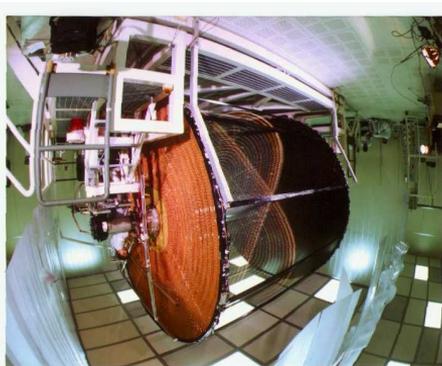


Ricostruzione coordinate x e y

Camere a deriva

Dato che la velocità di deriva degli elettroni nel gas (in determinate condizioni termodinamiche) è nota.

La posizione dell'interazione primaria può essere individuata misurando il **tempo di deriva** degli elettroni rispetto ad un riferimento esterno.



Gli straw tubes sono camere a deriva cilindriche “moncanale”.
Per ottenere informazioni sulle diverse coordinate spaziali si possono usare **piani incrociati di tubi**.

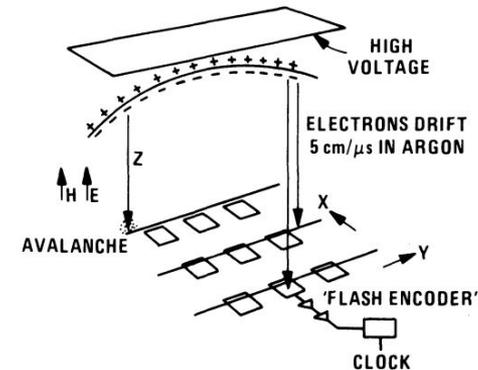
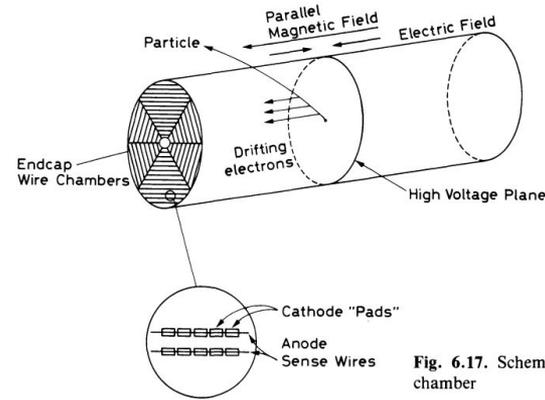
Time Projection Chamber

È l'unico rivelatore gas che permette di ricostruire **tracce in 3D**. Si tratta di un volume di gas cilindrico separato da un setto a potenziale negativo.

Le cariche create dalla ionizzazione migrano verso i "piatti" terminali che sono segmentati ed equipaggiati con MWPC.

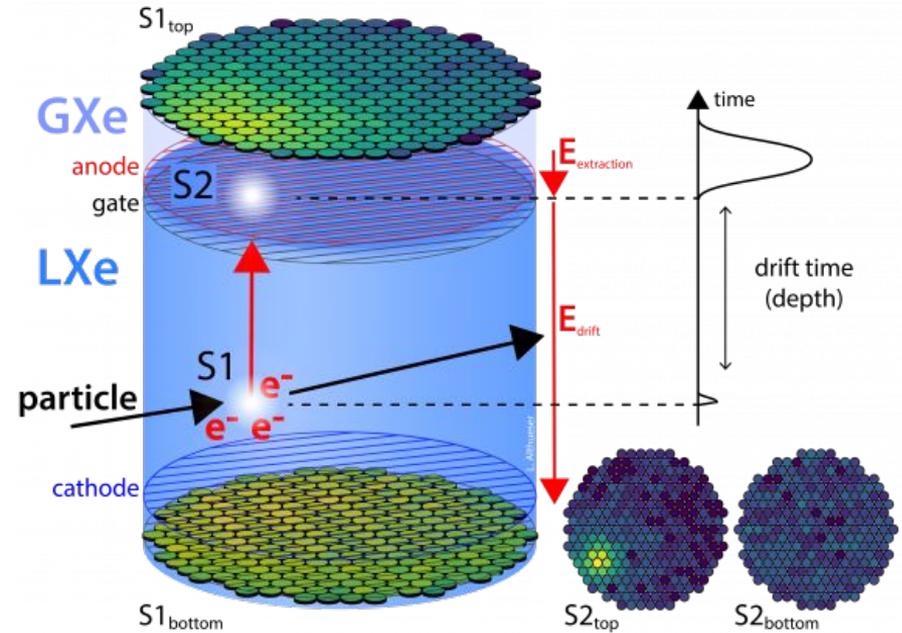
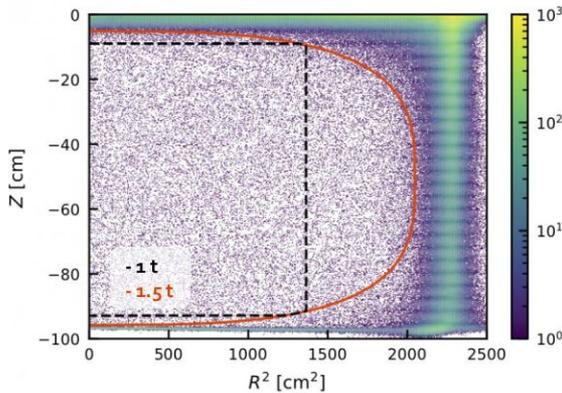
Campo elettrico e campo magnetico paralleli: riduce enormemente la diffusione.

Le coordinate x e y sono ricostruite dalle MWPC mentre la z (lungo l'asse del cilindro) dal tempo di deriva.

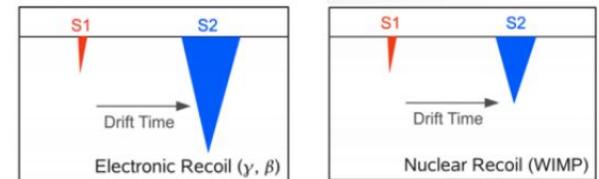


Dual Phase TPC

- Liquido + Gas
- Ricostruzione dell'energia
- Ricostruzione posizione
- Fiducializzazione del volume
- Discriminazione tra eventi di rinculo nucleare o elettronico



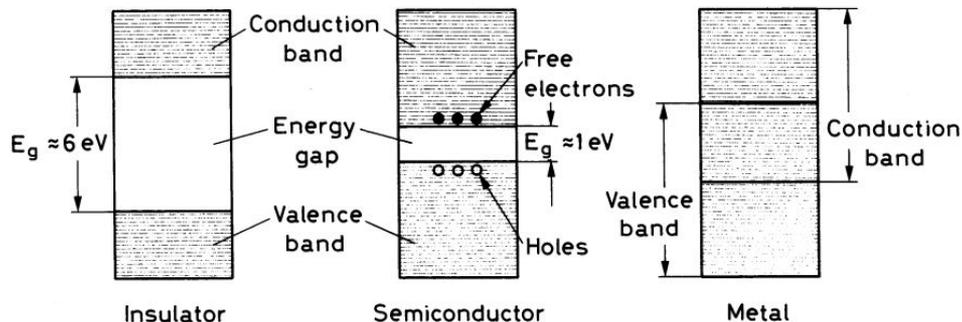
$$E = W \left(\frac{S_1}{g_1} + \frac{S_2}{g_2} \right)$$



In un reticolo cristallino periodico, esistono bande di energia ben definite per gli elettroni:

Banda di valenza: corrisponde all'energia di quegli elettroni che sono legati a precisi siti nel reticolo.

Banda di conduzione: energia di quegli elettroni che sono liberi di muoversi all'interno del reticolo.



In assenza di eccitamento termico, la banda di valenza è piena e la banda di conduzione vuota, non mostrando alcuna conduttività elettrica.

Per $T > 0$, un elettrone può acquisire un'energia sufficiente a passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, lasciando una lacuna (hole) nella banda di valenza che si comporterà a tutti gli effetti come una carica positiva libera di muoversi.

Questo processo può essere facilitato “drogando” il semiconduttore.

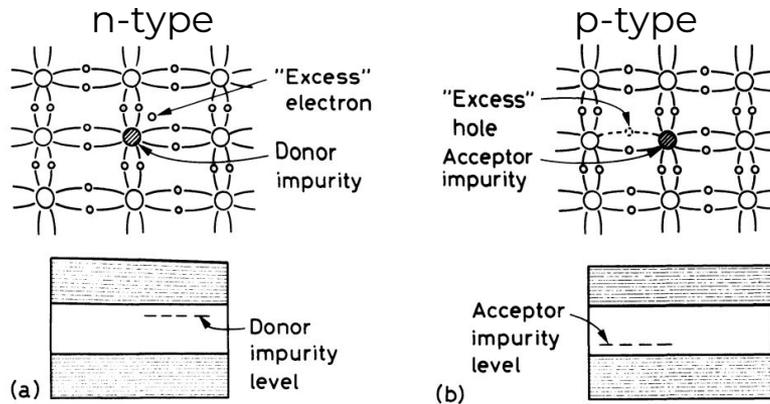
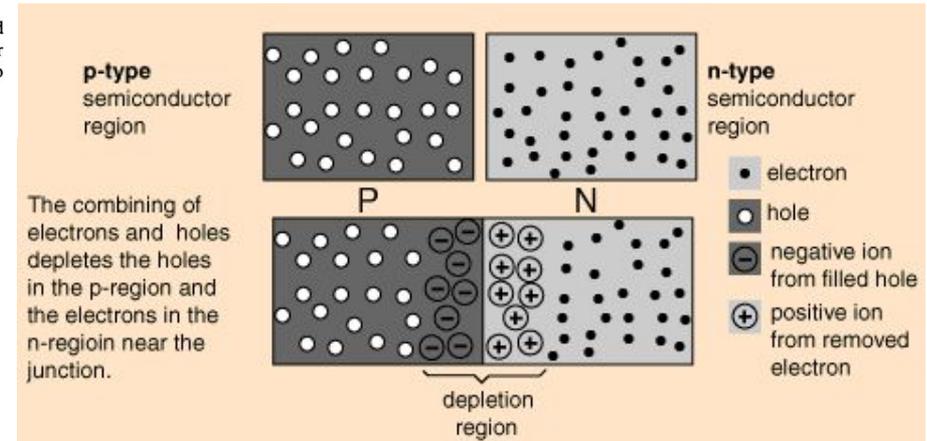


Fig. 10.4. (a) Addition of donor impurities to form n-type semiconductor materials. The impurities add excess electrons to the crystal and create donor impurity levels in the energy gap. (b) Addition of acceptor impurities to create p-type material. Acceptor impurities create an excess of holes and impurity levels close to the valence band

Si creano zone con carica spaziale diversa da zero (regione di svuotamento).

La migrazione si interrompe quando la differenza di potenziale tra le due zone cariche crea una barriera di potenziale al moto di ulteriori cariche libere

Creando una **giunzione** tra due semiconduttori drogati di tipo p ed n. I rispettivi portatori di cariche (h ed e) saranno inizialmente liberi di migrare anche attraverso la giunzione. Elettroni liberi migreranno dal n al p (lasciando atomi ionizzati bloccati nel reticolo), e lacune libere dal p in quello di tipo n (lasciando atomi che hanno catturato un elettrone bloccati nel reticolo).



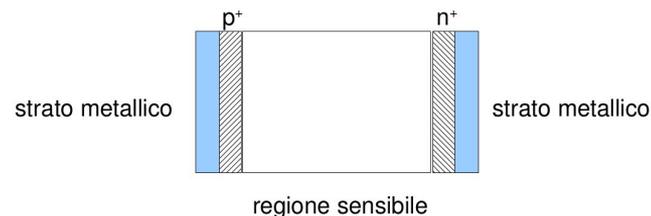
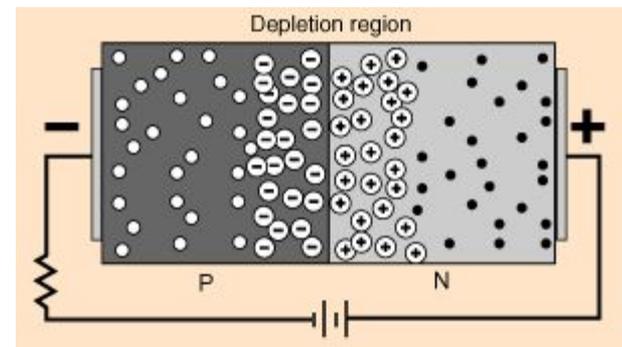
Giunzione polarizzata Inversamente

Nella regione di svuotamento (depletion) non ci sono più cariche libere di muoversi, ma, se applichiamo una **differenza di potenziale esterna** ai due capi della giunzione: potenziale maggiore al semiconduttore di tipo n:

Le lacune libere del semiconduttore di tipo p migreranno verso l'elettrodo negativo mentre gli elettroni liberi del semiconduttore di tipo n migreranno verso l'elettrodo positivo.

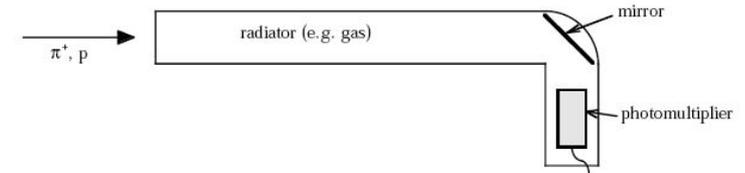
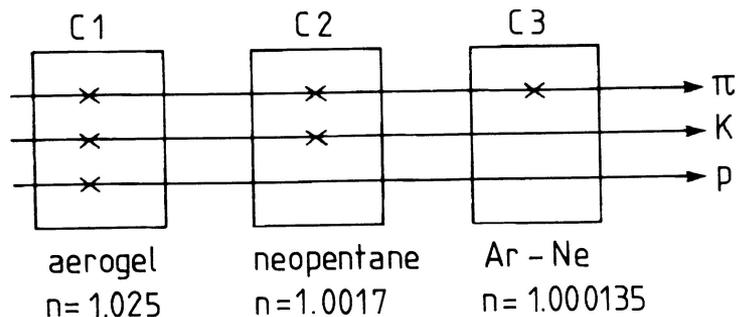
La regione centrale di svuotamento aumenterà in dimensioni. La regione di svuotamento può estendersi da 10^2 - 10^3 μm per tensioni di bias 10^2 - 10^3 V.

Il passaggio di una particella ionizzante nella regione di svuotamento creerà una **serie di coppie e-h** libere di muoversi che inizieranno a migrare verso gli elettrodi, inducendo un segnale elettrico.



La più semplice applicazione del fenomeno di produzione di luce Cherenkov è rappresentato dai **contatori a soglia**. Sappiamo che soltanto particelle con una velocità (β) maggiore di quella della luce nel mezzo ($1/n$) irradiano luce Cherenkov.

Utilizzando materiali con diverso n in serie, si possono discriminare particelle con stesso impulso ma massa diversa.



Refractive indices vary in the range of 1 to 2.

| Material | n | γ_{Th} |
|----------------------------|---|---------------|
| glass | 1.46 to 1.75 | 1.22 to 1.37 |
| scintillator | 1.4 to 1.6 | 1.3 to 1.4 |
| water | 1.33 | 1.52 |
| silica aerogel | $1 + (2 \text{ to } 10 \times 10^{-3})$ | 2 to 5 |
| pentane (at S.T.P.) | $1 + 1.7 \times 10^{-3}$ | 17 |
| carbon dioxide (at S.T.P.) | $1 + 4.3 \times 10^{-4}$ | 34 |
| helium | $1 + 3.3 \times 10^{-5}$ | 123 |

$$M_{\pi} = 140 \text{ MeV}$$

$$M_K = 494 \text{ MeV}$$

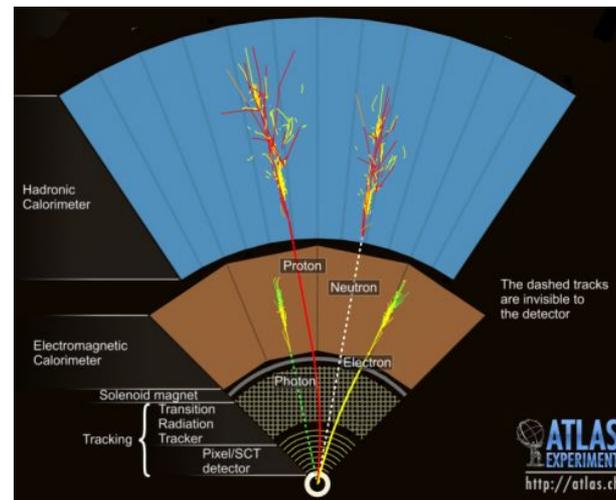
$$M_p = 938 \text{ MeV}$$

Una particella di alta massa ha bisogno di n grande per emettere luce Cherenkov

Calorimetria: misura dell'energia delle particelle prodotte in una reazione.

Si fa interagire la particella con un mezzo assorbente:

- 1. Assorbimento-Interazione:** La particella iniziale dà luogo a processi di produzione di particelle secondarie in cascata (elettromagnetiche o adroniche). Le particelle secondarie saranno in numero ed energia proporzionali all'energia della particella iniziale. Queste daranno luogo a processi di ionizzazione o eccitamento degli atomi o molecole del mezzo.
- 2. Rivelazione:** La carica o la luce prodotta viene raccolta mediante opportuni rivelatori. Dalla misura della quantità totale di particelle secondarie prodotte e della loro energia si può risalire all'energia della particella incidente. Dall'analisi della forma delle cascate prodotte e dalla loro posizione si può risalire all'identità della particella primaria e la sua traiettoria.



La risoluzione in energia di un calorimetro è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'energia della particella ed alla X_0 del calorimetro

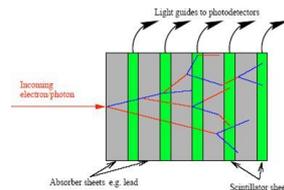
Calorimetri omogenei: Assorbimento-interazione e rivelazione possono essere svolti da uno stesso materiale abbastanza “massivo” da permettere un elevato numero di interazioni e sensibile ai prodotti di queste. Hanno una migliore risoluzione energetica poiché tutti i prodotti dei processi di interazione vengono rivelati. Ad elevate energie fanno fatica a garantire un buon contenimento delle valanghe ed hanno un costo più elevato

Calorimetri a campionamento: La parte assorbente è diversa da quella sensibile. In generale sono costruiti da una serie di strati assorbenti inframmezzati da strati sensibili. La parte assorbente è spesso costituita da strati sottili (qualche mm) di metallo ad elevata densità (Fe, Pb, U). La parte sensibile da scintillatori, rivelatori a gas, rivelatori a liquidi nobili.

Calorimetri di ATLAS e CMS

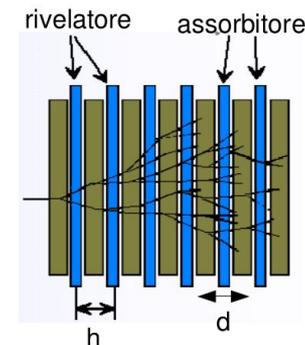
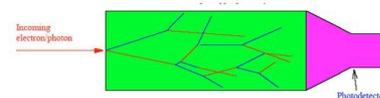
ATLAS

- Calorimetro a Campionamento
 - diviso in strati di mezzi assorbitori (Pb) e strati di materiali attivi (LAr).



CMS

- Calorimetro omogeneo
 - Unico mezzo usato come mezzo assorbente e di scintillazione (PbWO₄)



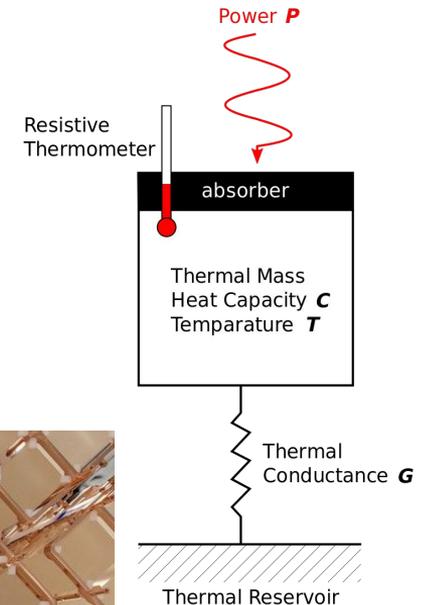
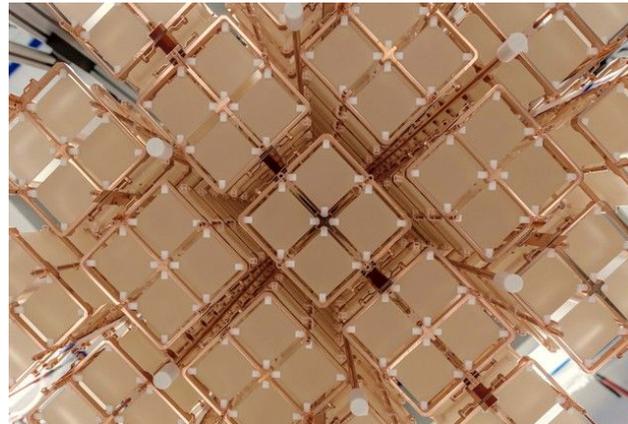
Consiste di un materiale assorbente, connesso con un bagno termico

La radiazione incidente sul materiale assorbente, rilasciando energia ne **aumenta la temperatura**, rispetto a quella del bagno termico. Più alta è l'energia depositata maggiore è la differenza di temperatura.

Il cambiamento di temperatura può essere misurato direttamente con un termometro resistivo, o la resistenza del materiale assorbente può essere usata come termometro.

Utilizzati a temperature molto basse possono ottenere sensibilità molto alte.

Non sono in grado di discriminare tra depositi di energia dovuti a particelle diverse. Inoltre sono molto lenti nel tornare alla temperatura di equilibrio, ma hanno un'ottima risoluzione energetica.



Caratterizzare un PMT

(1) Spettro di singolo foto-elettrone

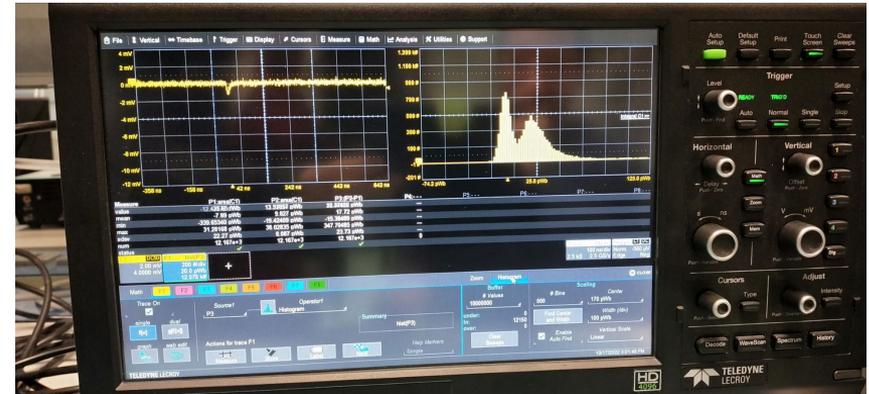
Vogliamo misurare lo spettro di Singolo foto-elettrone del PMT utilizzando dark noise per stimare il guadagno del PMT

Spettro di singolo fotoelettrone: distribuzione della quantità di carica dei segnali del PMT risultante dall'ingresso di un singolo fotoelettrone nel sistema moltiplicatore

Guadagno: fattore di amplificazione totale di un fotomoltiplicatore, dipende dal numero di dinodi e dalla tensione di lavoro per PMT

In condizione di singolo fotoelettrone (probabilità che venga emesso più di un fotoelettrone trascurabile), il numero degli elettroni rilevati all'anodo equivale al guadagno del PMT

Dalla posizione del picco nello spettro fornisce il valore possiamo stimare il guadagno



(2) Misura con Scintillatore

Accoppiamo il PMT con uno scintillatore: **CsI(Tl)** Ioduro di Cesio drogato con Tallio

Avremo così un rivelatore a scintillazione per misurare radiazione gamma ambientale

