

**Incont  
ri ■ di  
fisica**

**2008**

*Misura dell'efficienza e della risoluzione temporale di una camera a fili dell'esperimento LHCb*

*P. Campana – M. Anelli  
A. DiVirgilio – R. Rosellini*

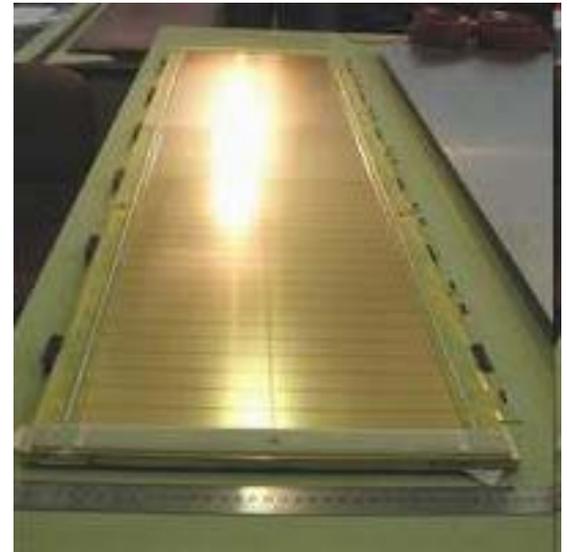
## ***Scopo della misura***

Con uno dei rivelatori dell'esperimento LHCb, installato su LHC al CERN di Ginevra, si vogliono determinare le caratteristiche di

- efficienza di rivelazione di raggi cosmici e di
- risoluzione temporale,

al variare del valore della tensione applicata all'anodo

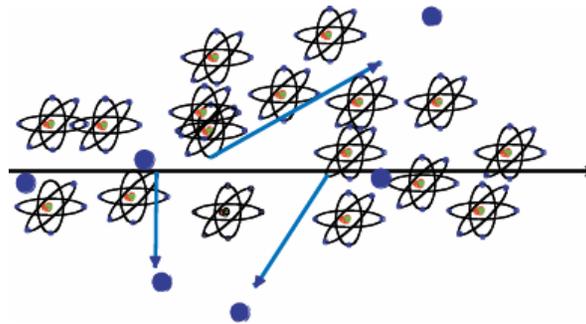
- Introduzione ai meccanismi di ionizzazione nei gas
- Rivelatori proporzionali a gas
- L'esperimento LHCb
- Le camere a fili dell'esperimento LHCb
- L'apparato di misura



# Introduzione ai rivelatori a gas

## *Il passaggio delle particelle nella materia*

Le particelle cariche attraversano la materia lasciando dietro di se' atomi eccitati, coppie di ioni-elettroni (nei gas) o coppie elettroni-lacune (nei solidi).



Eccitazione:

I fotoni emessi nei processi di dis-eccitazione nei materiali trasparenti possono essere rivelati da strumenti quali i fotomoltiplicatori o i semiconduttori sensibili ai fotoni.

Ionizzazione:

Applicando un campo elettrico al volume del rivelatore, gli elettroni di ionizzazione e gli ioni si muovono verso elettrodi metallici, il che induce segnali che possono essere rivelati da opportune schede di elettronica.

# Particelle cariche nella materia (I)

- Una particella carica che passi nella materia interagisce con i nuclei e gli elettroni di questa cedendo ad essi parte della sua energia.
- Se ci concentriamo solo sulle interazioni elettromagnetiche la maggior parte dell'energia sara' ceduta agli elettroni.
- Possiamo usare la formula di Bohr per il calcolo classico dell'energia ceduta da una particella che sia molto piu' pesante di un elettrone.



L'impulso che l'elettrone subisce e':

$$I = \int F dt = e \int E_t \frac{dx}{v}$$

solo la componente trasversa di E conta per motivi di simmetria

Dal teorema di Gauss

$$\int E_t 2\pi b dx = 4\pi z e , \quad \int E_t dx = \frac{2ze}{b}$$



$$I = \frac{2ze^2}{bv}$$

Energia ceduta all'elettrone

$$\Delta E(b) = \frac{I^2}{2m} = \frac{2z^2 e^4}{mv^2 b^2}$$

# Particelle cariche nella materia (II)

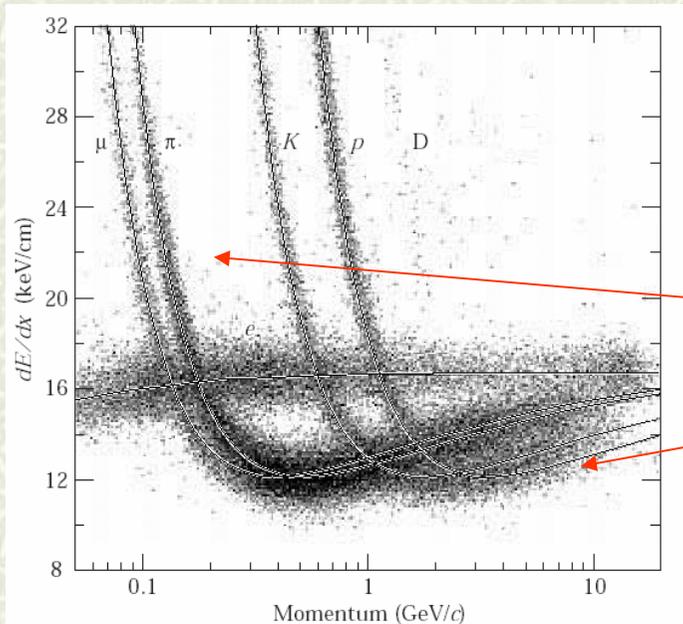
- Se consideriamo  $N_e$  il numero di elettroni per unita' di volume:

L'energia persa in un guscio cilindrico a distanza  $b$

$$-dE(b) = \Delta E(b) N_e dV = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv} N_e \frac{db}{b} dx$$

Integrando su tutto il volume (Bethe-Bloch)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv} N_e \ln \frac{\gamma^2 m v^3}{z e^2 v}$$

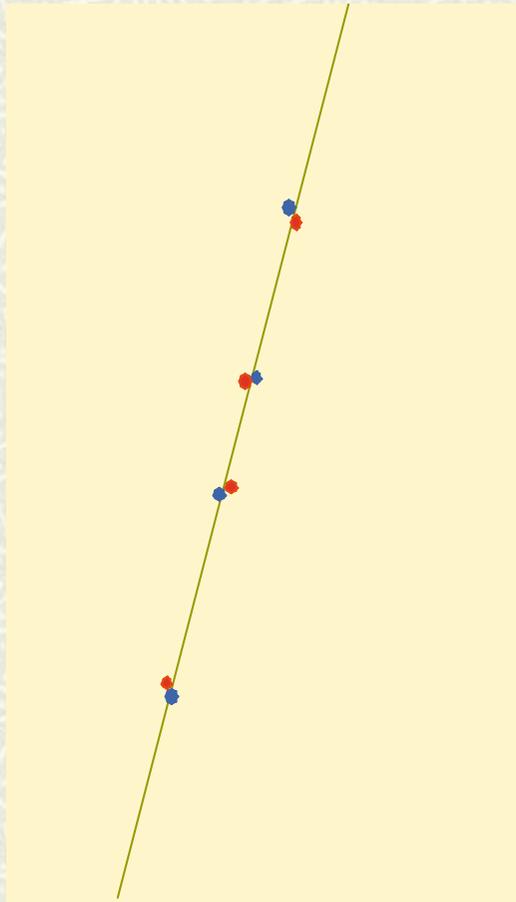


$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_e r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{z}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]$$

# Ionizzazione del gas

## Interazioni coulombiane tra particelle cariche e le molecole del gas

*Ionizzazione primaria: creazione di coppie elettrone-ione*



GAS (STP)	Elio	Argon	Xenon	CH <sub>4</sub>	DME
dE/ dx (keV/ cm)	0.32	2.4	6.7	1.5	3.9
n (ion pairs/ cm)	6	25	44	16	55

### Statistica della ionizzazione primaria:

Poisson: 
$$P_k^n = \frac{n^k}{k!} e^{-n}$$

*n*: media  
*k*: numero effettivo

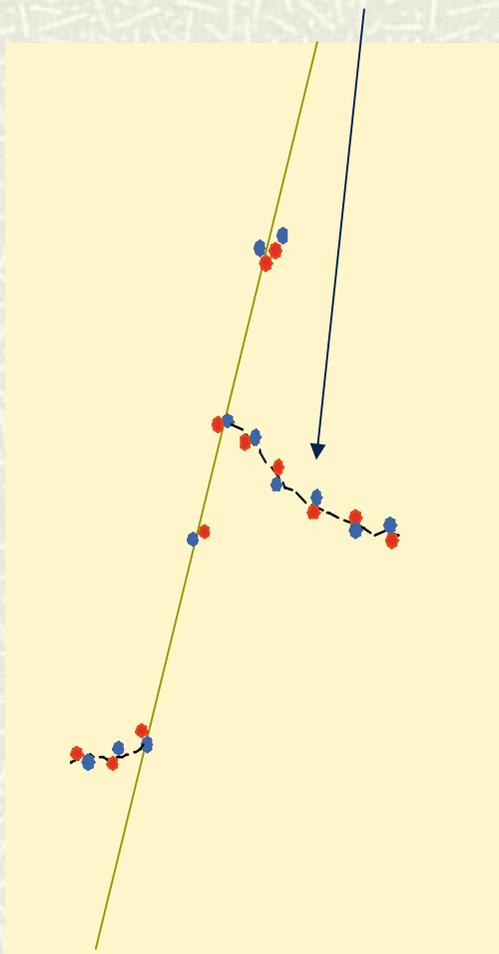
**Massima efficienza di rivelazione:**  $\epsilon = 1 - e^{-n}$

GAS (STP)	Spessore	$\epsilon$ (%)
Elio	1 mm	45
	2 mm	70
Argon	1 mm	91.8
	2 mm	99.3

# Ionizzazione del gas

Ionizzazione secondaria e totale

*CLUSTERS ed elettroni DELTA*

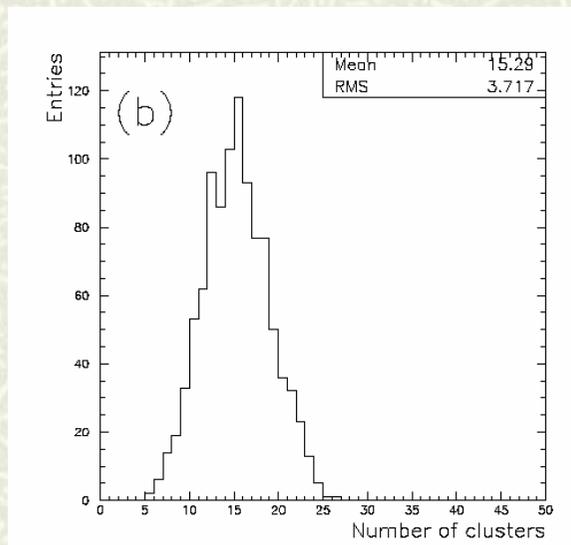


GAS (STP)	Helium	Argon	Xenon	CH <sub>4</sub>	DME
n (ion pairs/cm)	6	25	44	16	55
N (ion pairs/cm)	8	90	300	53	160

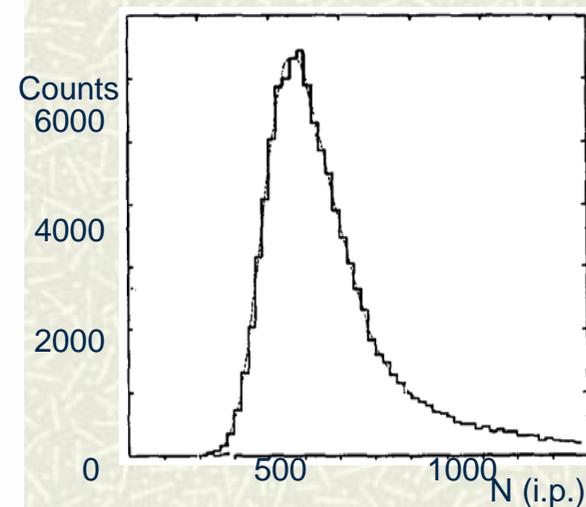
**N:** total ion-electron pairs

$$\frac{n}{N} \sim 3$$

*Distribuzione statistica del numero di cluster (Landau):*



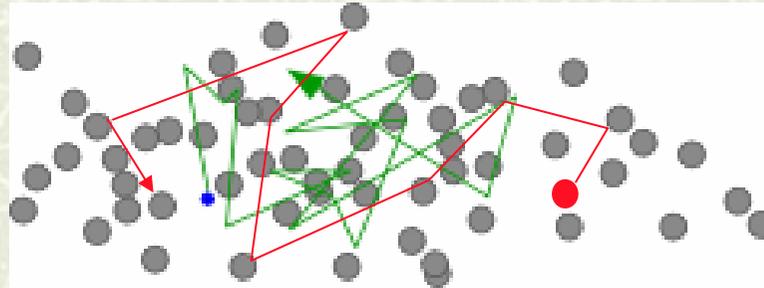
3 mm Ar/CO<sub>2</sub> (70-30)  
1 bar



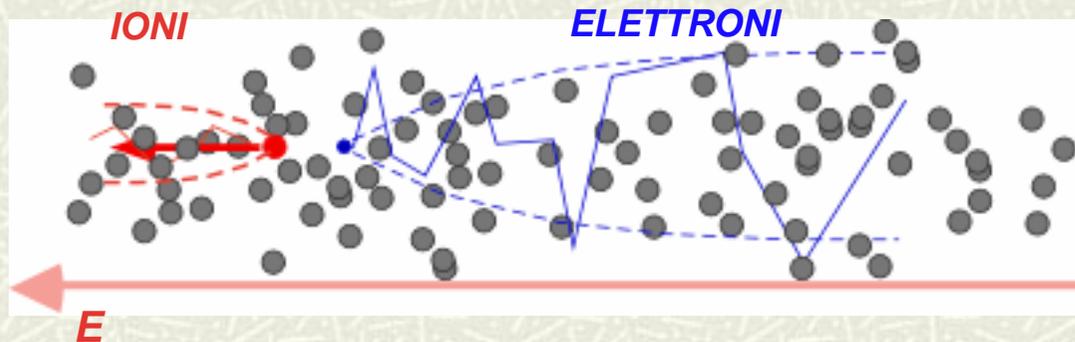
4 cm Ar-CH<sub>4</sub> (95-5)  
5 bars

# Deriva delle cariche nel gas

Con un campo elettrico nullo  $E = 0$ : "diffusione termica"

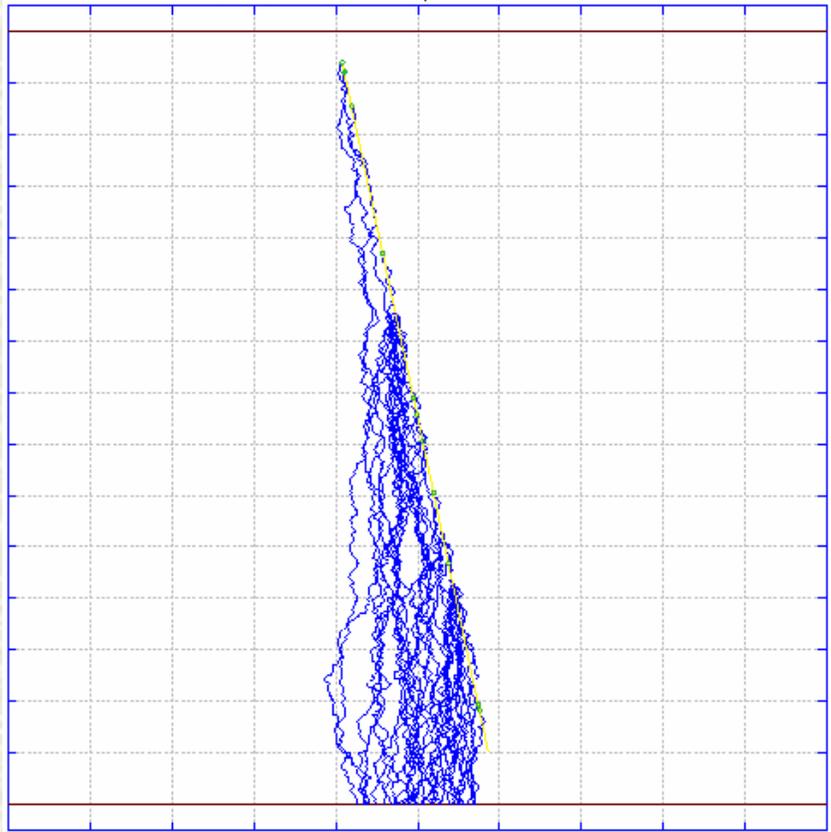


In presenza di un  $E > 0$ : trasporto di carica e diffusione



# Diffusione e risoluzione spaziale

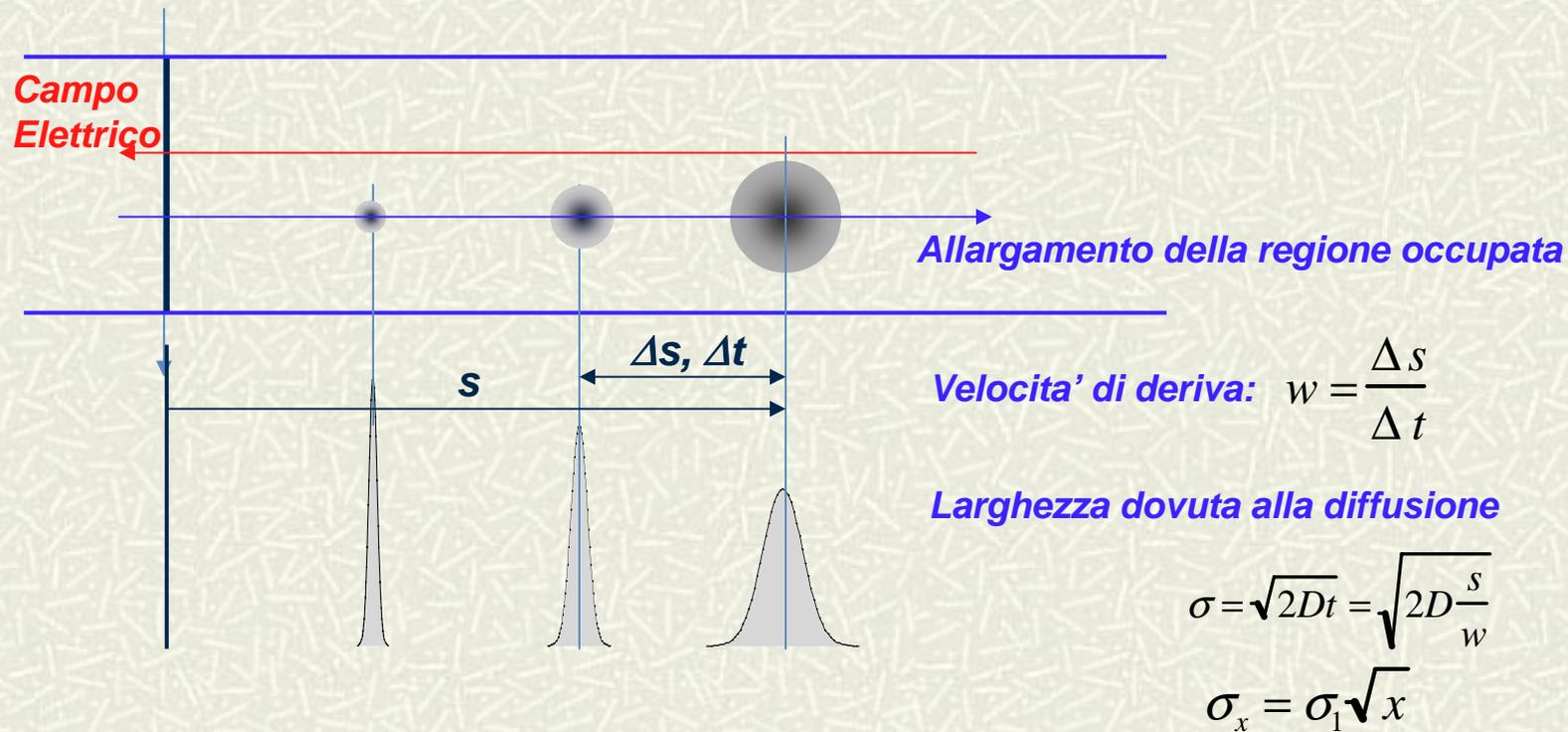
---



La diffusione delle cariche nel gas tende ad allargare la nube elettronica.

L'informazione di dove e' passata la particella si perde e diminuisce la risoluzione spaziale del rivelatore.

# Deriva e diffusione degli elettroni



**Espressione di Townsend per la velocita' di deriva:**  $w = \frac{e}{2m} E \tau$        $\tau$  : tempo libero medio

L'aumento della velocita' degli elettroni fa diminuire il  $\tau$ .  
La velocita' di deriva satura...

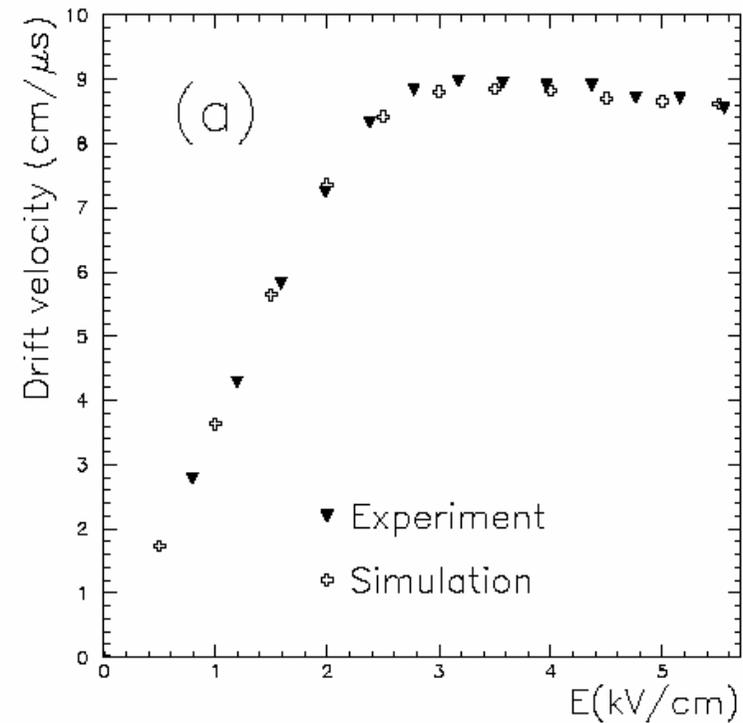
# Velocita' di deriva degli elettroni

Velocita' di deriva in una miscela  
Ar/CO<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> (60/20/20).

Satura a

$$w^- \approx 10 \text{ cm}/\mu\text{s}$$
$$\Rightarrow 100 \text{ }\mu\text{m}/\text{ns}$$

3000 volte la velocita' degli ioni



# La moltiplicazione nel gas

Il segnale dovuto alle sole cariche di ionizzazione non e' in generale rivelabile: e' necessario un processo di amplificazione della carica.

Questo puo' essere ottenuto accelerando gli elettroni liberi con un elevato  $E$ .

Quando l'energia di un elettrone supera il primo potenziale di ionizzazione nel gas, esso riesce a ionizzare un secondo atomo.

La probabilita' di ionizzazione ha un **massimo per  $E_e = 100$  eV**.

Il numero di coppie create e', al primo ordine, proporzionale al numero degli elettroni primari:

$$dn/dx = \alpha n_0 \Rightarrow M = n/n_0 = e^{\alpha x}$$

$\alpha$  e' detto primo coefficiente di Townsend e rappresenta l'inverso del cammino libero medio di ionizzazione.

In generale  $\alpha = \alpha(E)$  e secondo l'approssimazione di Korff  $\alpha/p = A e^{-Bp/E}$ .

Poiche'  $E = E(x) \Rightarrow \alpha = \alpha(x)$  :

$$M = \exp \left[ \int (\alpha(x)) dx \right]$$

# Limitazioni alla moltiplicazione

La presenza di gas **elettronegativi** (Fluoro, Ossigeno ...) puo' limitare lo sviluppo di una valanga attraverso la cattura di elettroni liberi:

$$-\frac{dn}{dx} = \eta(x)x$$

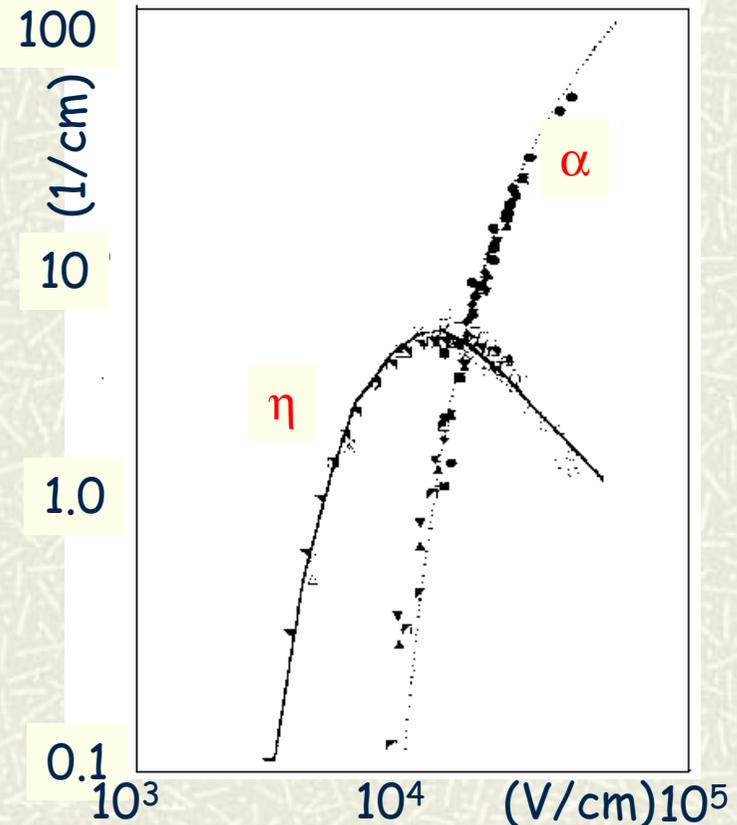
$\eta$  coefficiente di attachment.

Il guadagno effettivo diventa quindi:

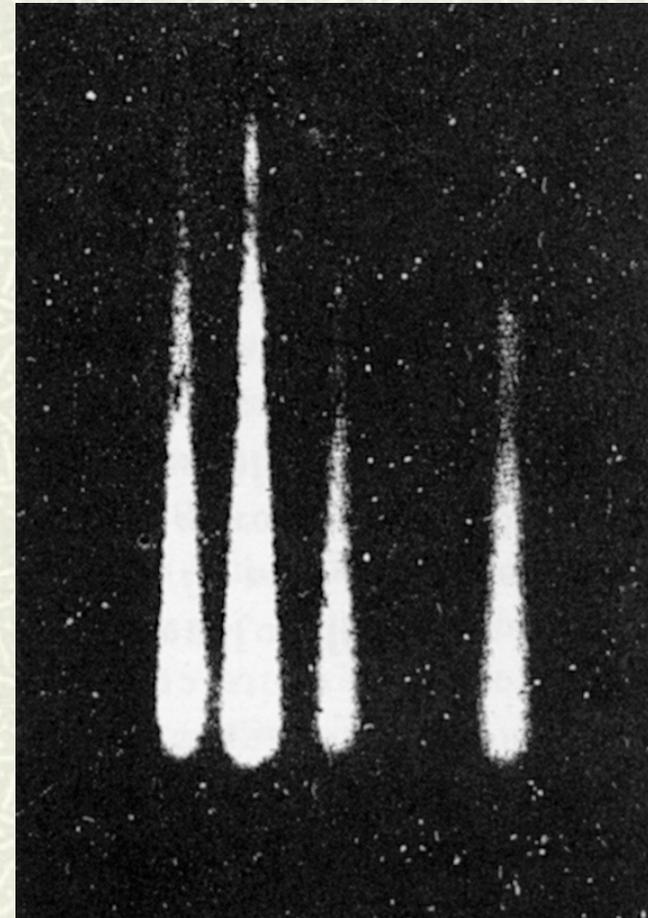
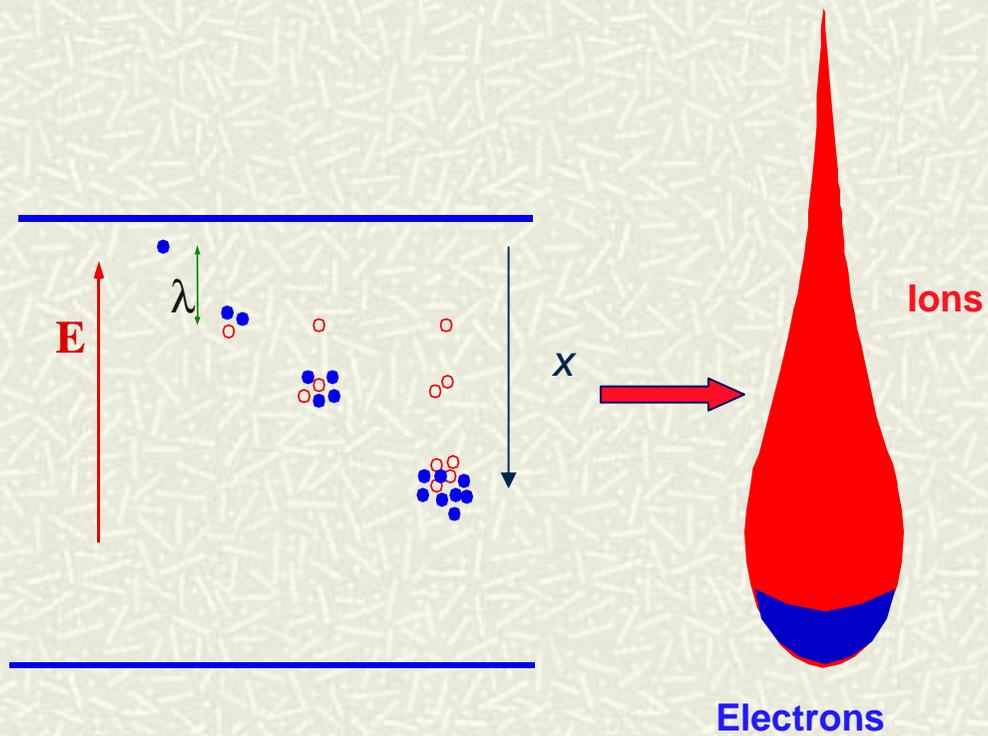
$$M = \exp \left[ \int (\alpha(x) - \eta(x)) dx \right]$$

Inoltre se la densita' di carica cresce molto si puo' avere la formazione di scariche nel gas.

Uno studio fenomenologico ha portato al limite di **Raether** per cui le scariche si innescano se in una valanga sono presenti piu' di  $10^7 \div 10^8$  elettroni.



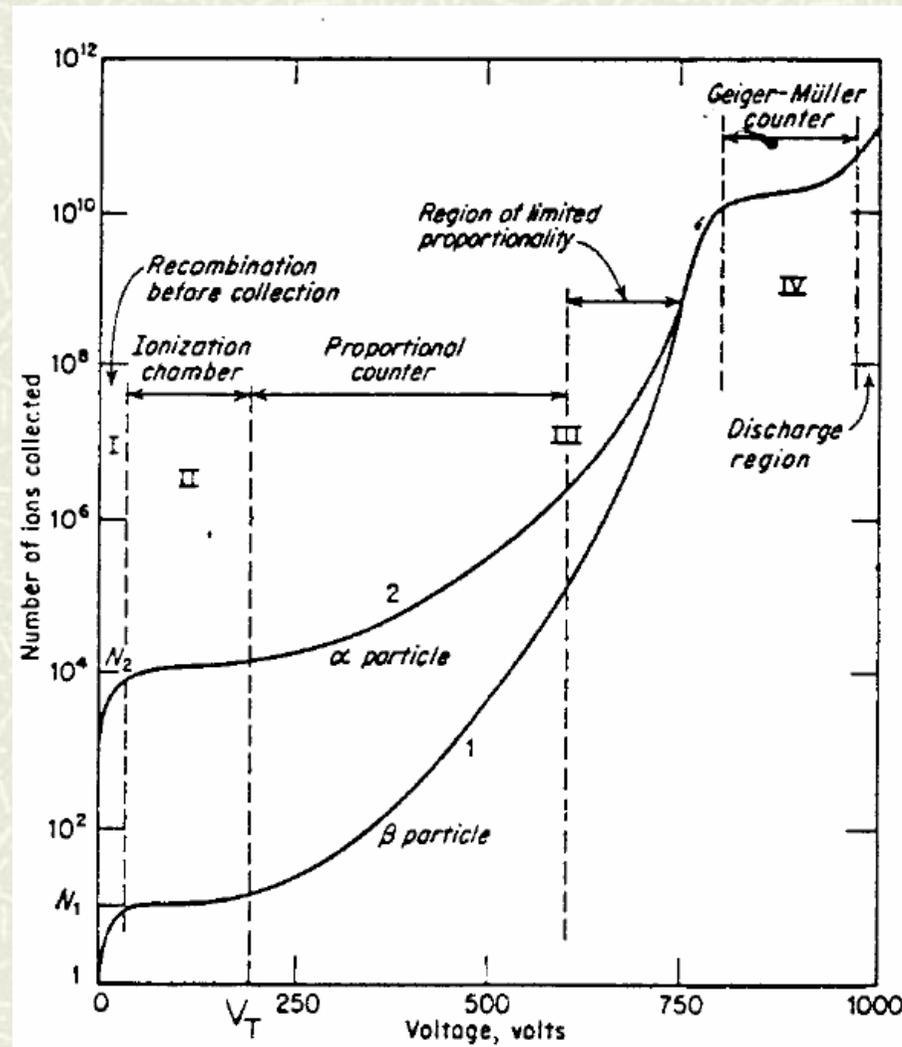
# La valanga



# Moltiplicazione e tensione

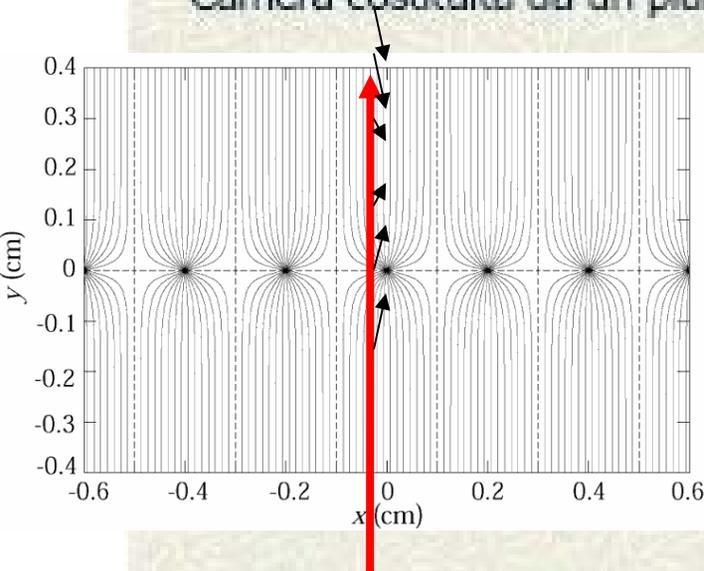
A seconda della tensione applicata la risposta del rivelatore e' diversa:

1. ricombinazione
2. ionizzazione
3. proporzionalita'
4. proporzionalita' ridotta
5. scarica.



# Camere proporzionali a multifilo (MWPC)

Camera costituita da un piano di **filì anodici** ( $V_0$ ) posto tra due piani catodici.



Nella zona lontana dai fili il campo è praticamente uniforme:

$$E = cV_0/2\epsilon_0 s$$

e fa derivare gli elettroni.

In prossimità dei fili il campo è quello tipico di un condensatore cilindrico:

$$E = (cV_0/2\epsilon_0) \times (1/r)$$

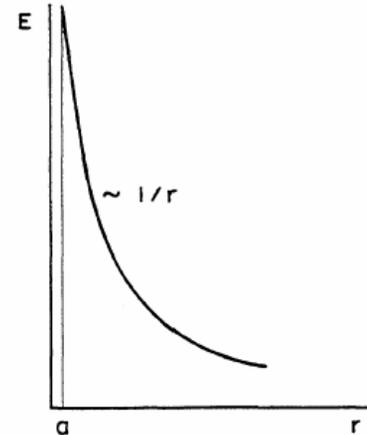
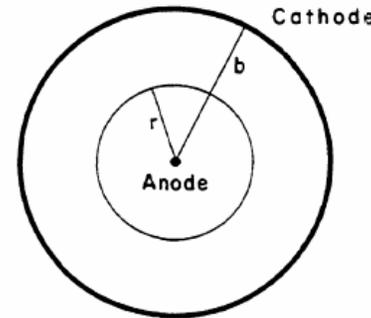
A causa della dipendenza inversa dalla distanza, a qualche decina di  $\mu\text{m}$  dal filo si innesca un processo di moltiplicazione a valanga:

- ✓ Gli elettroni sono raccolti sul filo;
- ✓ Gli ioni iniziano a migrare verso i catodi.

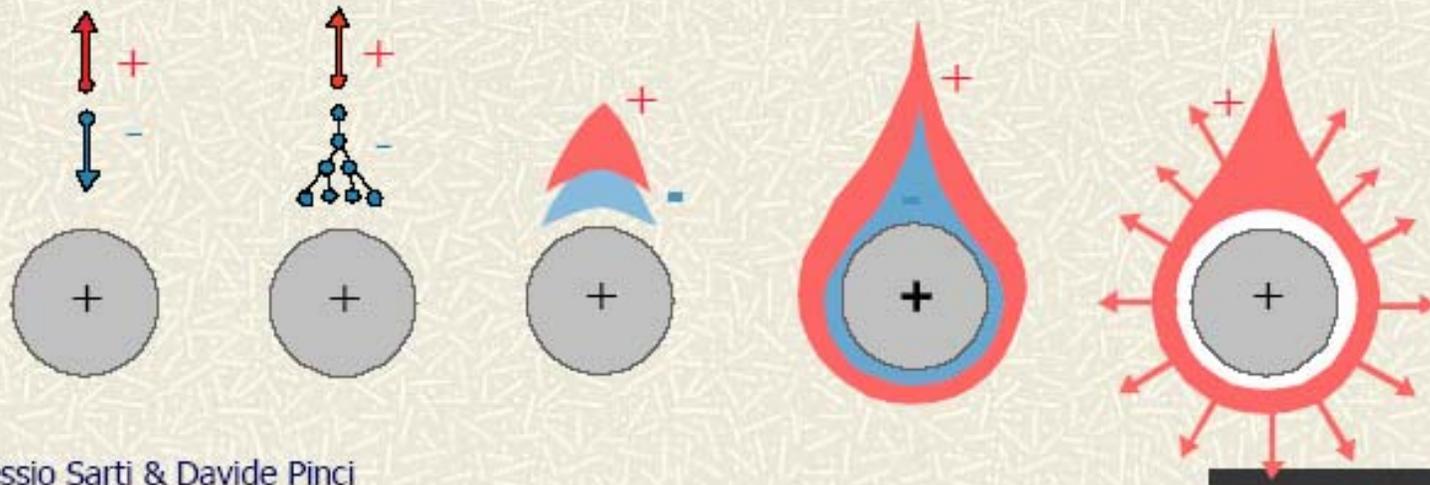
# Valanga sul filo

Abbiamo visto che il campo elettrico attorno al filo va come quello di un condensatore cilindrico:

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



La valanga si sviluppa attorno al filo



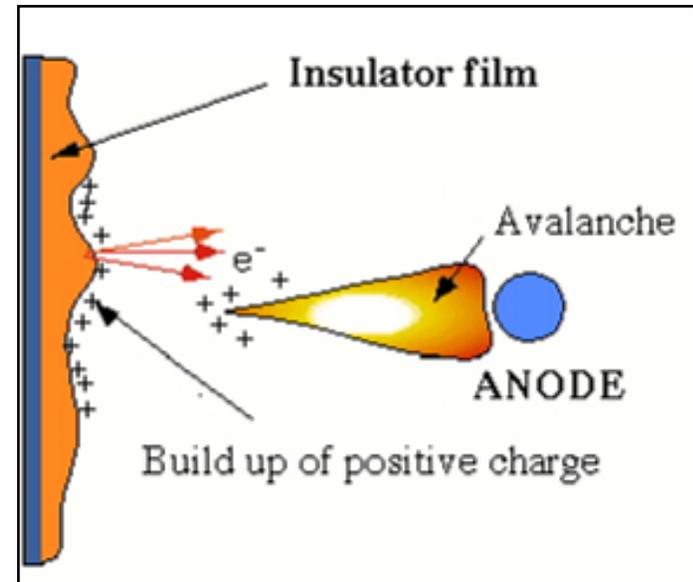
## ***La scelta del gas in una camera proporzionale***

I gas nobili (ad es Argon) hanno un basso potenziale di ionizzazione e quindi una buona capacita' di produrre ionizzazione primaria e secondaria (circa 100 coppie/cm)

Tuttavia nel processo di moltiplicazione, si genera un intenso flusso di fotoni ( $E=11.6$  eV nel caso dell'Argon) che possono estrarre elettroni dal catodo, generando una instabilita' nel funzionamento.

Si tende quindi ad associare un gas poliatomico ( $\text{CO}_2$ , Metano, Isobutano) che ha la capacita' di assorbire tali fotoni

Inoltre vi sono gas che hanno la proprieta' di diminuire gli effetti di invecchiamento del rivelatore (effetto Malter) dovuti agli intensi flussi di radiazione (ad es il  $\text{CF}_4$ )



## La formazione del segnale (I)

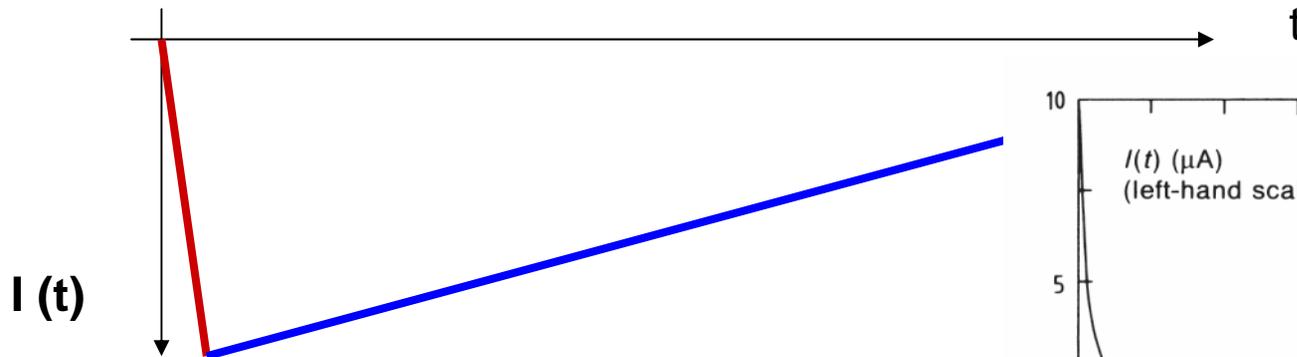
Elettroni e ioni si muovono, nell'intenso campo elettrico vicino al filo, ma in direzioni opposte, e con velocità differenti

Gli elettroni vengono raccolti in pochi ns – gli ioni in centinaia di microsecondi

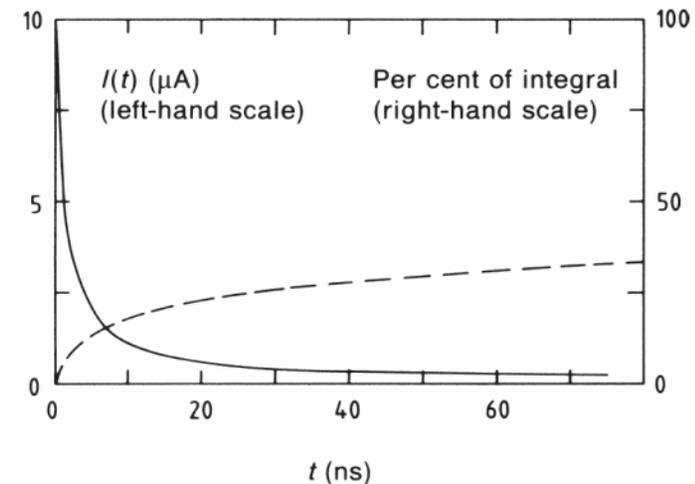
$$Q_{\text{TOT}} (1 \text{ cm gas}) = 100 e^- \times 10^5 = 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ C} = 1.5 \text{ pC}$$

Il segnale è generato dal moto delle cariche nel campo elettrico

Gli **elettroni** si spostano per circa 0.1 mm nelle vicinanze dell'anodo ( e contribuiscono per 1% di  $I(t)$  )



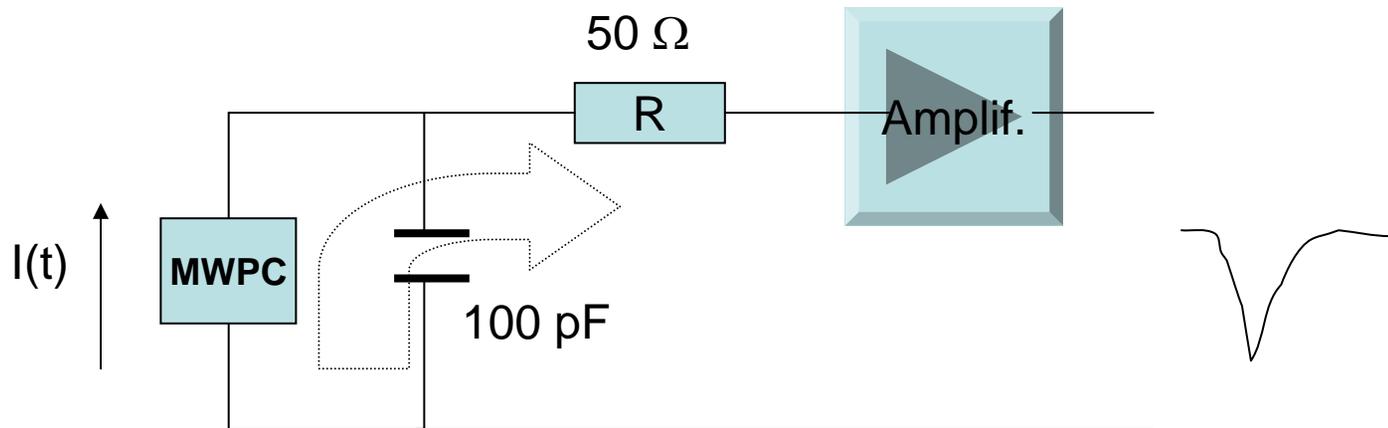
Gli **ioni** si spostano su lunghezze più grandi (qualche mm verso il catodo – 99% del segnale)



## La formazione del segnale (II)

I rivelatori sono costruiti in modo tale da raccogliere velocemente l'informazione ed essere pronti al successivo passaggio di particelle. Ad esempio in LHC, c'è un potenziale segnale ogni 25 ns

Cio' è ottenuto con una "derivazione" del segnale con un semplice circuito RC



$\tau = 100 \text{ pF} \times 50 \text{ } \Omega = 5 \text{ ns}$  - Confrontare questo con  $\tau > 100 \text{ ns}$  degli ioni

Con questo sistema solo il 5-10% del segnale è disponibile: occorre amplificarlo (circa  $\times 100$ )

# Prestazioni temporali

La risoluzione temporale e' legata a due termini:

✓ la fluttuazione della posizione della traccia rispetto al filo:

$$(s/\sqrt{12}) \times (1/v)$$

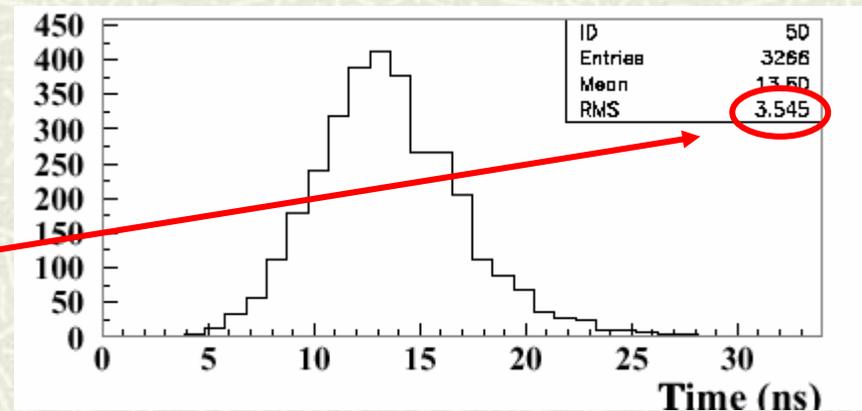
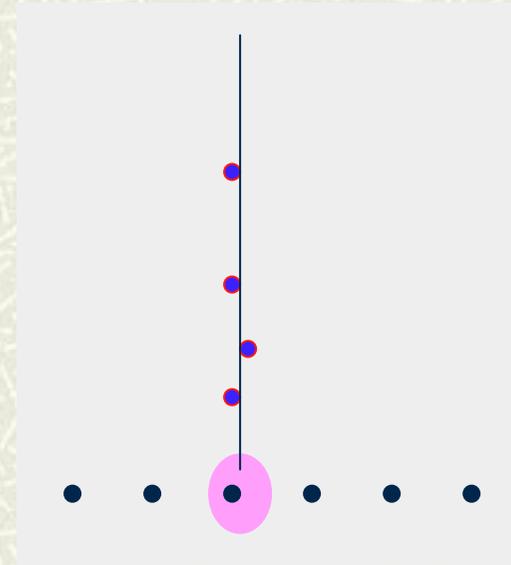
✓ la fluttuazione della posizione lungo la traccia del cluster piu' vicino al filo:

$$1/(nv \sqrt{2})$$

con  $s = 1.5 \text{ mm}$ ,  $n = 5 \text{ cl/mm}$   $v = 100 \mu\text{m/ns} \Rightarrow \sigma_t = 5 \text{ ns}$ .

Con camere a due gap lette in OR:

$$\sigma_t \Rightarrow \sigma_t/\sqrt{2} \approx 3.5 \text{ ns.}$$





# LHCb MWPC

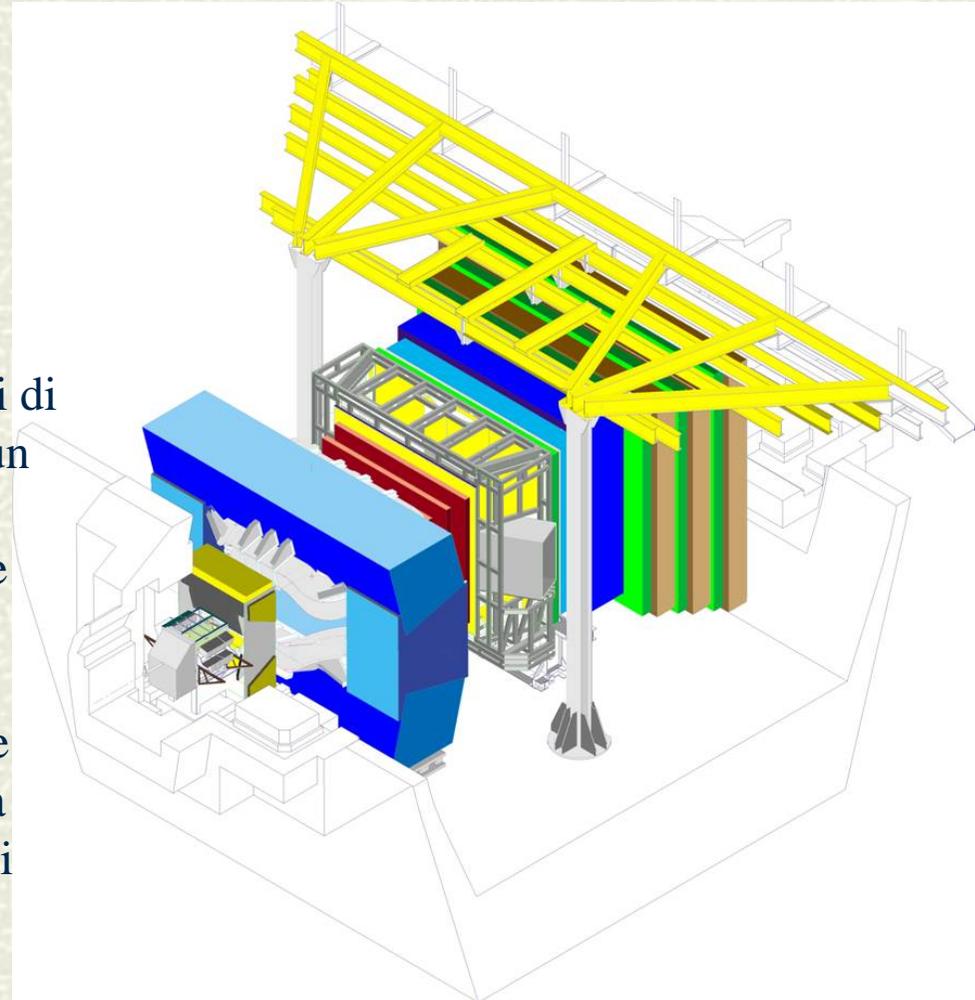


# L'esperimento LHCb

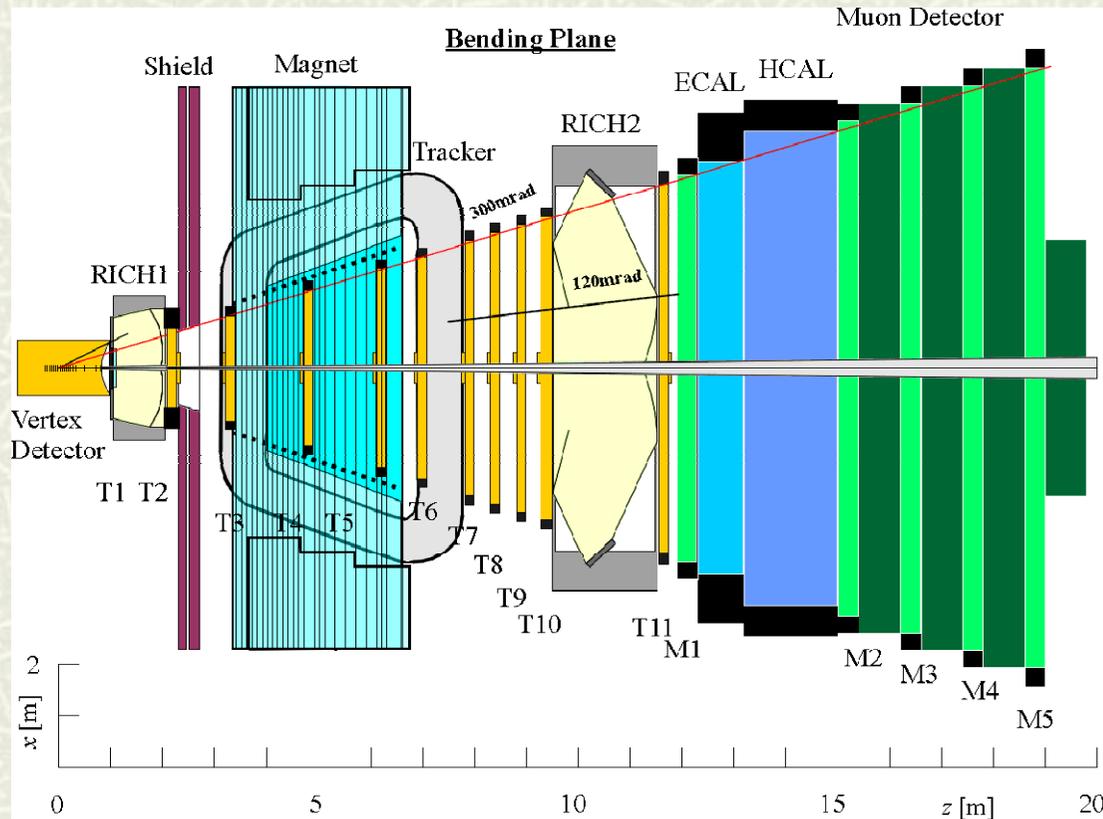
Al CERN protoni collidono contro altri protoni ogni 25ns. I decadimenti delle particelle prodotte nella collisione vengono osservati con dei rivelatori “compositi” (rivelatori di particelle cariche e neutre, al silicio, a gas o a luce Cerenkov)

Per la rapida identificazione dei decadimenti di interesse l'esperimento e' caratterizzato da un sistema di “Trigger” che comanda l'acquisizione delle informazioni di interesse provenienti dall'insieme dei rivelatori.

In LHCb i decadimenti contenenti un muone sono considerati “interessanti” ed hanno una linea di trigger dedicata: per la rivelazione di eventi con  $\mu$  e' stato progettato un rivelatore specifico....



# Trigger di muoni in LHCb

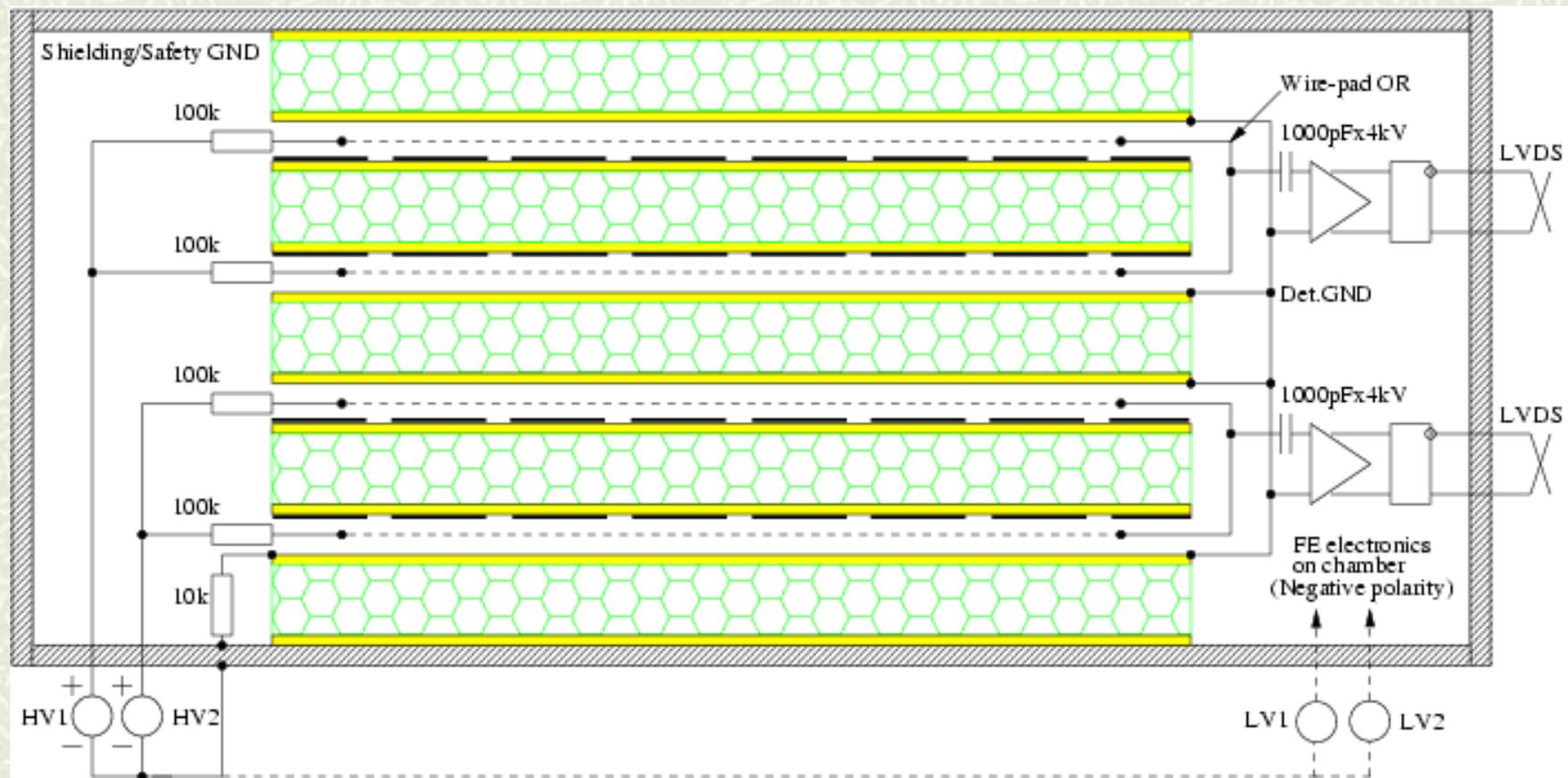


In LHCb sono previste 5 stazioni per la rivelazione di muoni: 1 davanti (M1) e 4 dopo (M2,5) il calorimetro

Il sistema produce un segnale di trigger per l'esperimento se nelle 5 stazioni vi e' un segnale in coincidenza, nella finestra temporale di 25 ns, in una zona spaziale che viene selezionata in corrispondenza all'impulso del muone.

## MWPC usate in LHCb : vista d'insieme

2 layer di ogni camera sono collegati in “OR” a livello hardware: i 2 layer di “doppia gap” sono combinati in lettura con un solo modulo di front-end. I 4 layers, nel loro insieme, costituiscono una camera o stazione di rilevazione per i muoni.



# Elettrostatica/dinamica in una MWPC (applicazione)

Nel caso di  
 $h/2=2.5\text{mm}$

$r_a=15\mu\text{m}$

$s=2\text{mm}$

$V_a: 2750\text{ V}$

si ha:

$E_a: 262.39\text{kV/cm}$

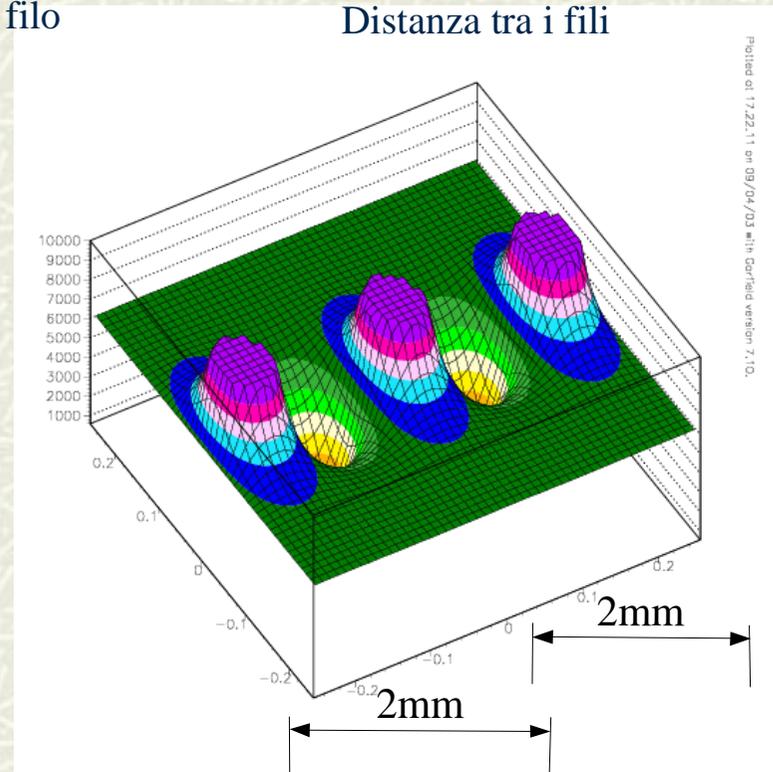
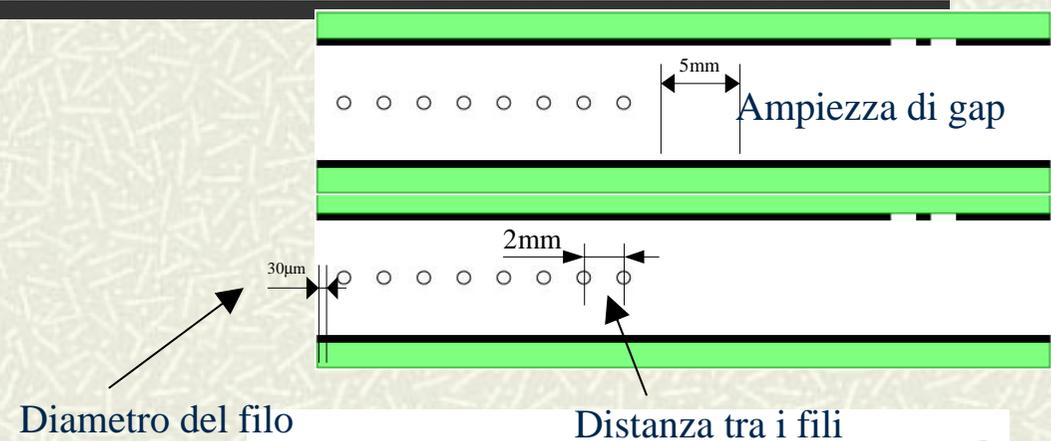
$E_c: 6.18\text{ kV/cm}$

Guadagno :  $10^5$

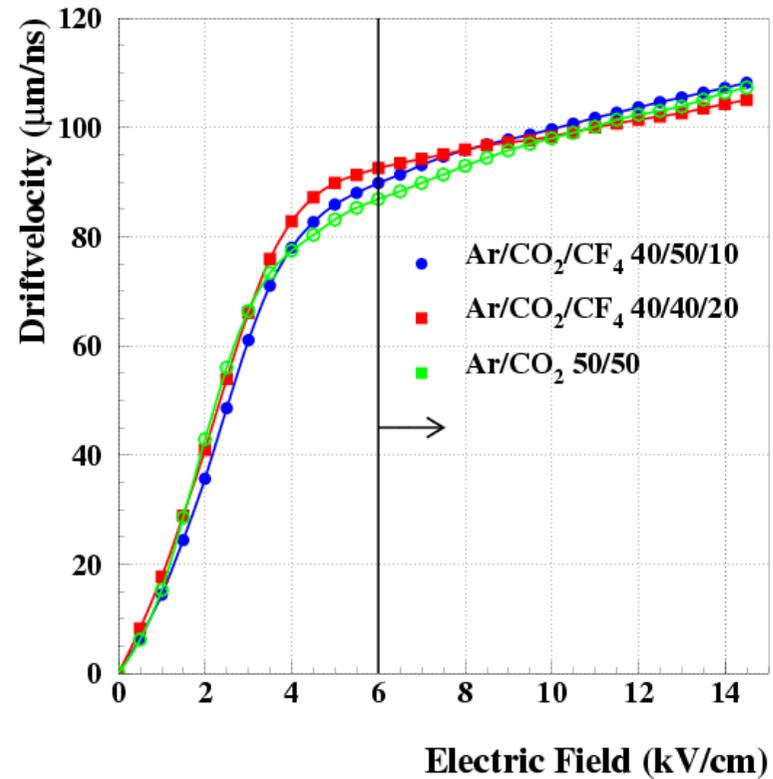
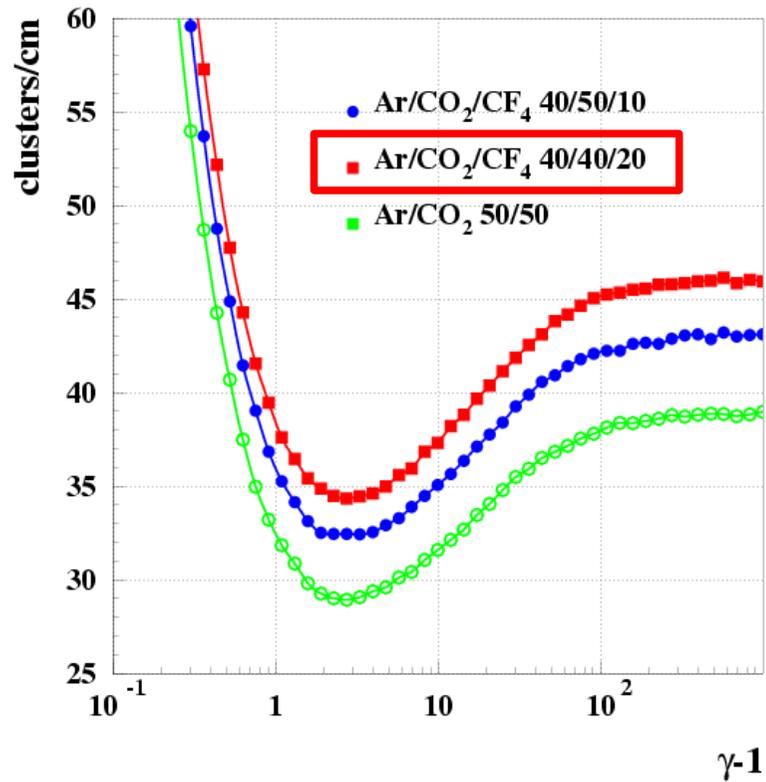
$\delta V$  : caduta di potenziale dovuta alla  
carica spaziale: trascurabile

Simulazione del  
campo elettrico

Alessio Sarti & Davide Pinci



# Gas utilizzato nelle MWPC di LHCb



Considerando muoni con  $E = 10$  GeV ci aspettiamo:

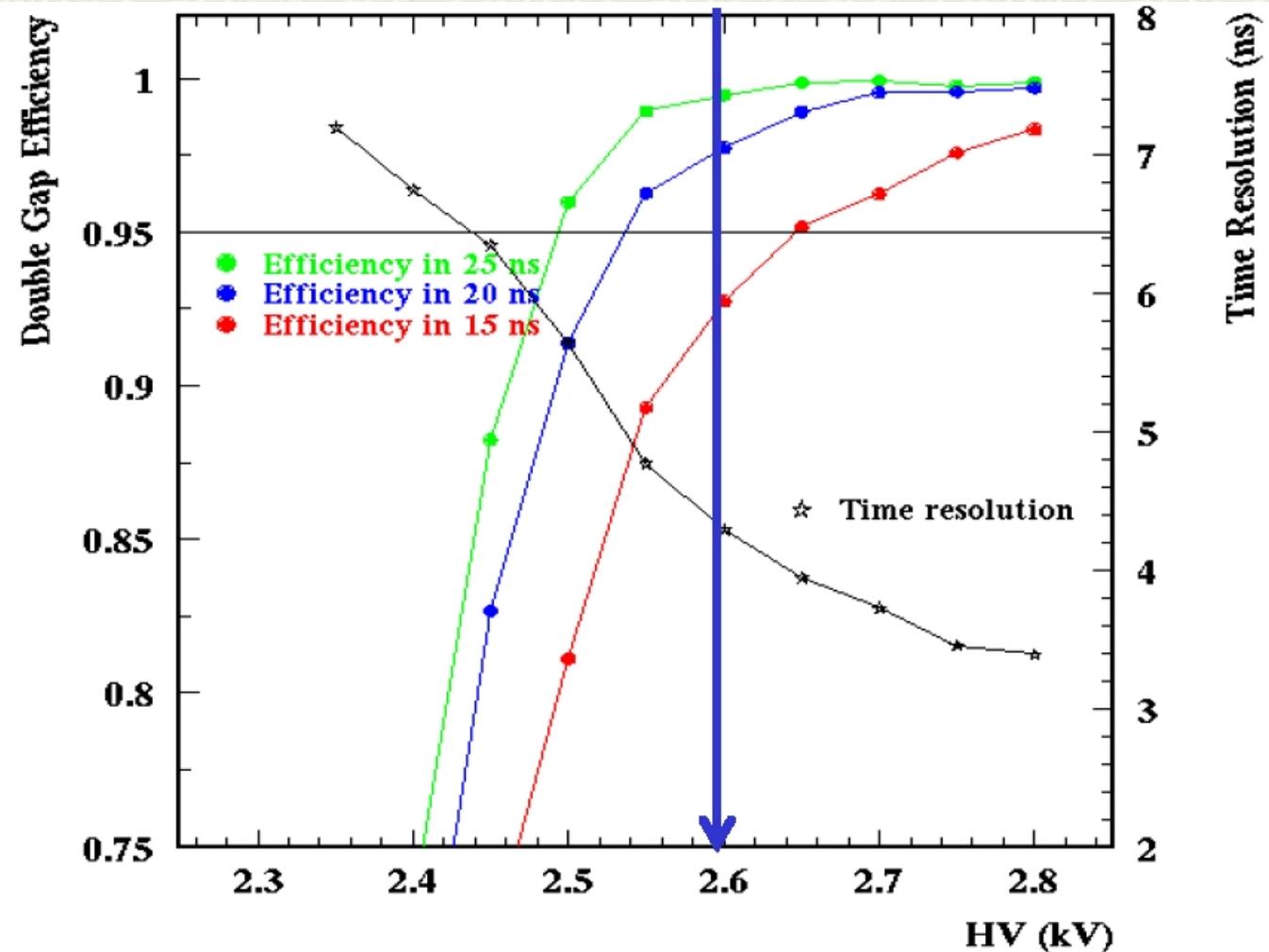
- $\sim 40$  clusters/cm
- $\sim 2.38$  e<sup>-</sup>/cluster,
- $\sim 107$  e<sup>-</sup>/cm

La velocità di drift  $\sim 90-100 \mu\text{m/ns}$  è saturata: un cambiamento piccolo del campo elettrico non perturba significativamente la velocità di deriva

# Misura delle efficienze in funzione di V

La richiesta di una elevata efficienza nella rilevazione del passaggio di muoni in una finestra temporale di 25 ns e' largamente soddisfatta per una differenza di potenziale di lavoro pari a 2.6kV

Efficienza in differenti finestre temporali



# Il sistema di test con raggi cosmici

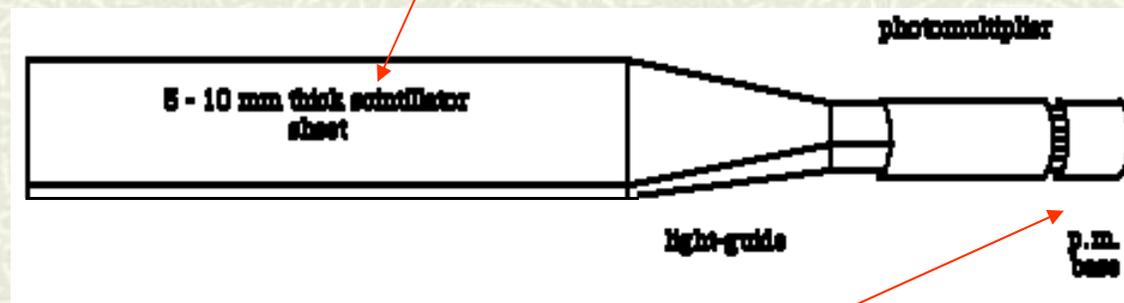
# Il sistema di trigger

---

- # Il "trigger" e' un concetto fondamentale nella fisica delle alte energie. In ogni esperimento e' necessario un sistema veloce in grado di evidenziare se un evento visto dall'apparato possa essere potenzialmente interessante da studiare e vada quindi registrato
- # Gli eventi non interessanti saranno rigettati
- # Il nostro piccolo apparato ha un suo sistema di trigger:
  - segnala il passaggio di un muone
  - registra il tempo di tale passaggio
  - da' il via al sistema di acquisizione che registra i dati provenienti dalle camere a fili per controllare se hanno "risposto"

# Scintillatori e fotomoltiplicatori (I)

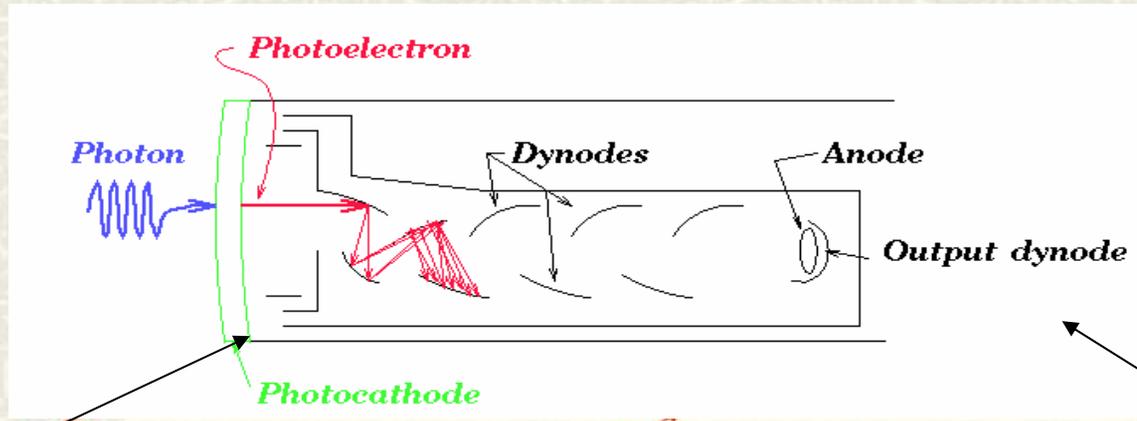
- # Il sistema di trigger e' basato su "rivelatori a scintillazione":
  - Una lastra di materiale organico scintillante (plastico, trasparente) che produce fotoni di bassa energia se e' attraversato da particelle cariche;



- I fotoni viaggiano nel cristallo e vengono rivelati attraverso FotoMoltiplicatori (PM) che amplificano il segnale  $\times 10^6$

# Scintillatori e fotomoltiplicatori (II)

- Il fotomoltiplicatore converte il segnale ottico in segnale elettrico rivelabile

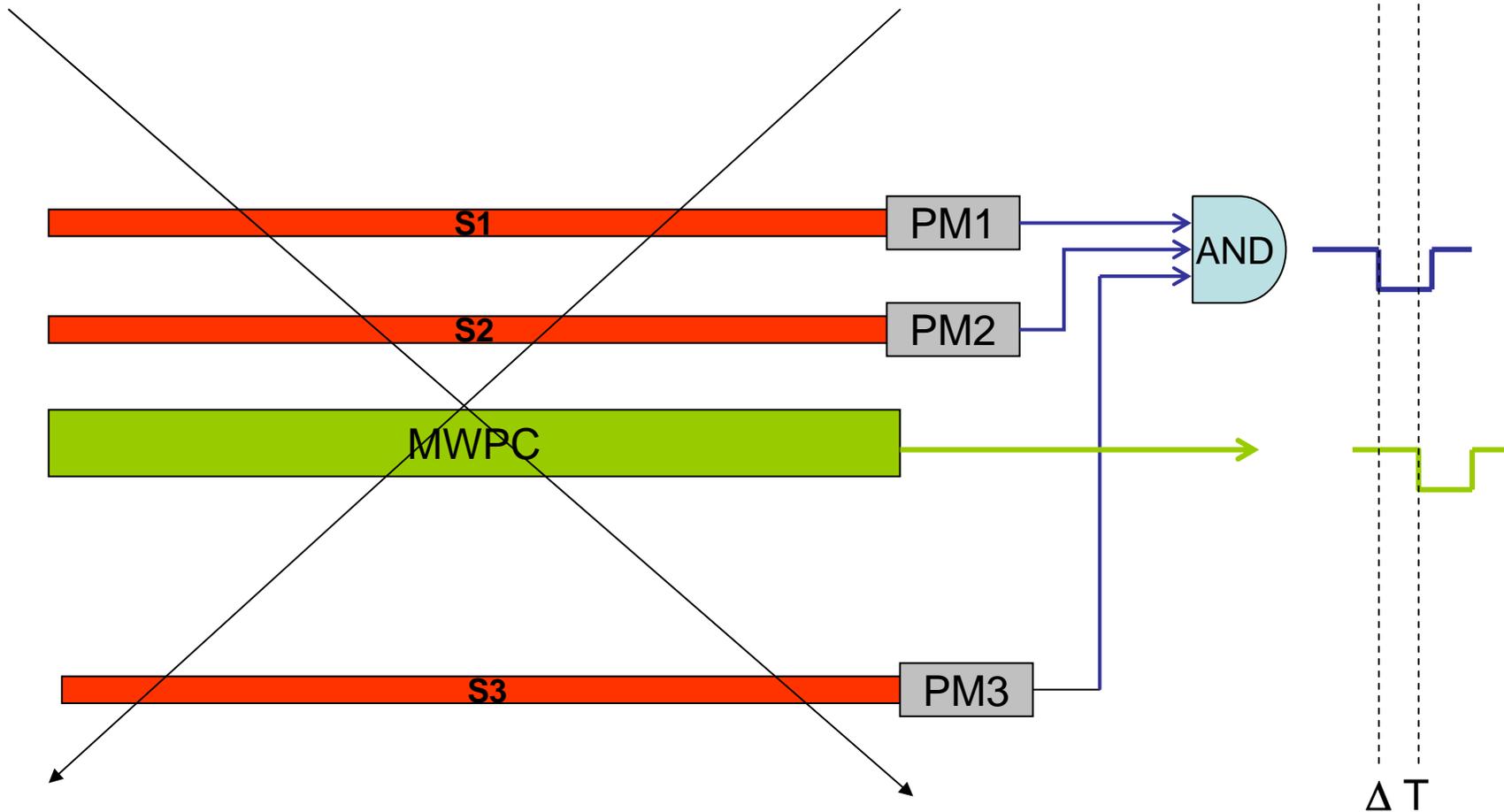


il fotone estrae un elettrone dal "fotocatodo"

L'elettrone primario viene accelerato attraverso successivi campi elettrici ed urtando contro dinodi metallici estrae elettroni secondari.

sull'anodo finale si arriva ad avere  $10^6$  elettroni che forniscono un segnale elettrico rivelabile

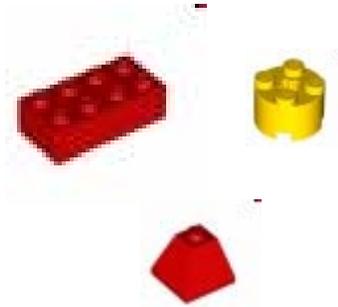
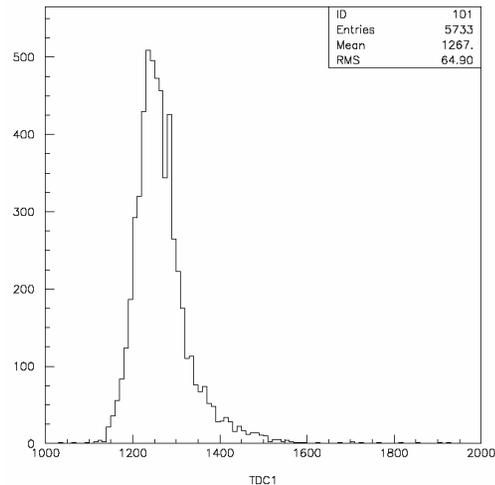
## *Il sistema di misura dell'efficienza e della risoluzione temporale della camera*



Raggi cosmici  $\sim 1 \text{ cm}^{-2} / \text{min} \rightarrow 25 \text{ eventi} / \text{min}$  nel nostro apparato

## *I “mattoncini LEGO” del sistema di acquisizione*

- Il crate CAMAC e quello NIM
- I discriminatori
- Il modulo di coincidenza
- Il controller CAMAC
- Lo Status A
- Il Time to Digital Converter (TDC)
  
- L’acquisizione dei dati su un file su PC
  
- L’analisi dei dati con un visualizzatore grafico (Paw)



## **Bibliografia**

F.Sauli – Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers –  
<http://doc.cern.ch/yellowrep/1977/1977-009/p1.pdf>

W.Riegler – Summer Student Lectures at CERN  
<http://indico.cern.ch/tools/SSLPdisplay.py?stdate=2008-06-30&nbweeks=7>

W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics  
Experiments, Springer-Verlag, 1994

Un indice bibliografico vastissimo  
<http://www-linux.gsi.de/~andronic/physics/ref-det.html>