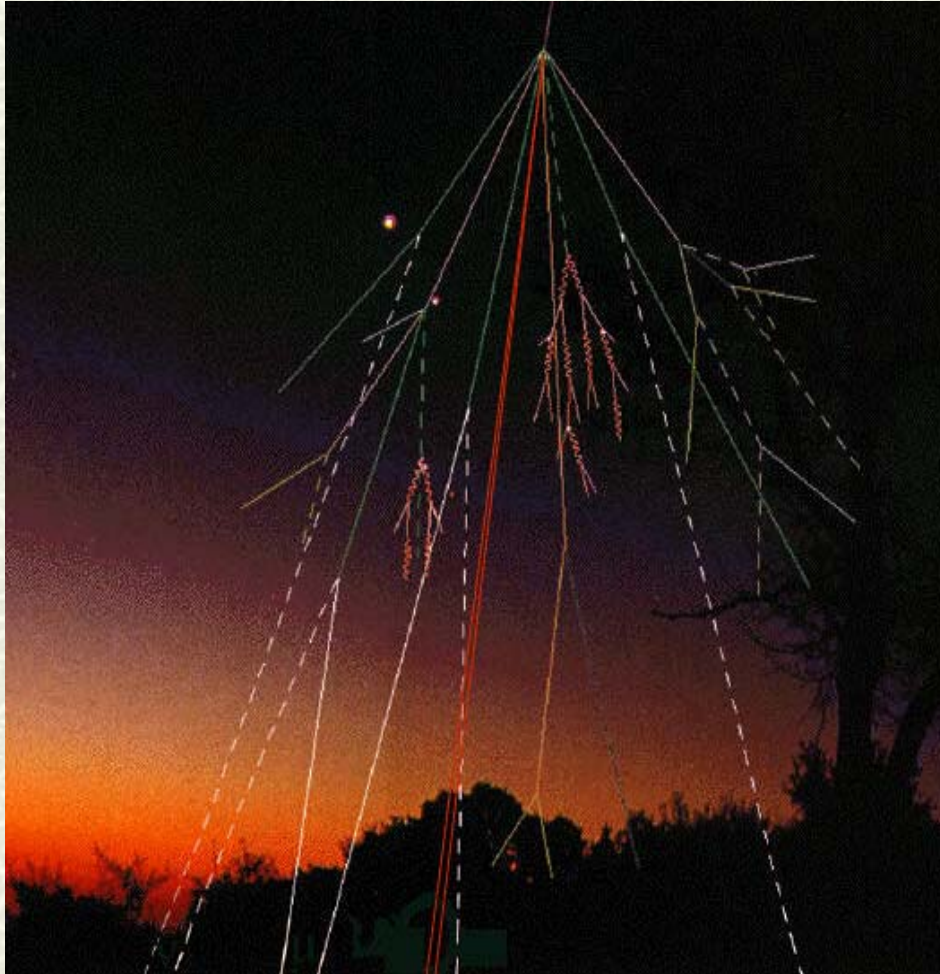


I raggi cosmici



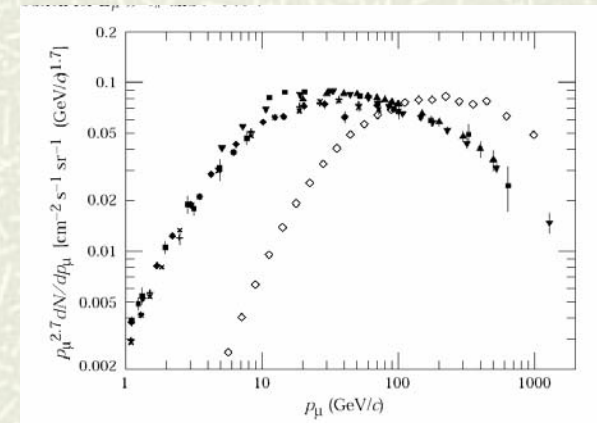
I raggi cosmici



Dal sole e dal resto della galassia giungono sino alla nostra atmosfera particelle di alta energia

Tra questi i muoni, particelle prodotte a 15 km di altezza sono i più numerosi

In media, un rivelatore orizzontale è colpito da un muone al minuto al centimetro quadrato

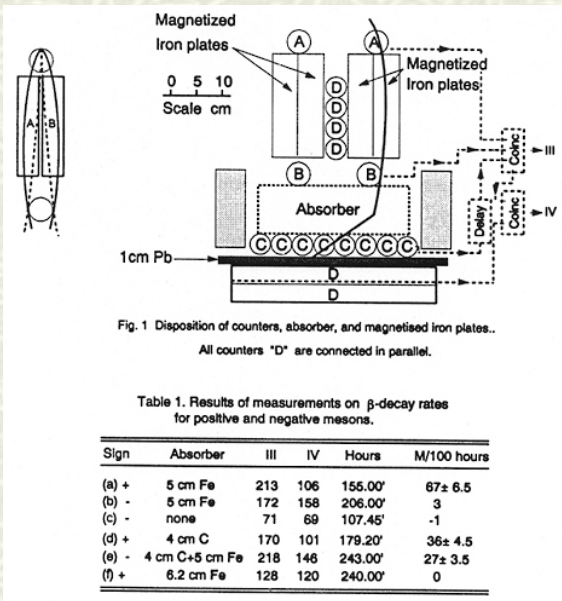


reale spettro dei muoni

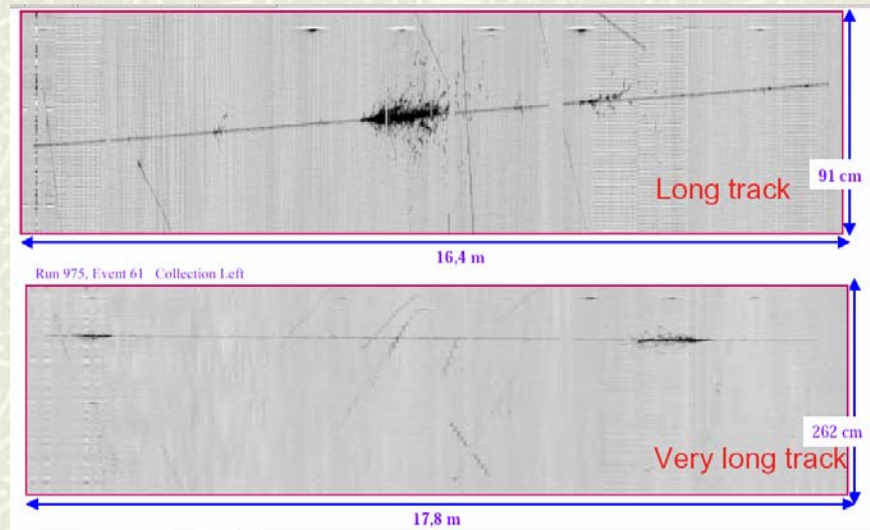
I muoni

- Sono particelle del tutto identiche agli elettroni:
 - particella elementare
 - carica = $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
 - interazioni = elettromagnetiche e deboli
 - esiste l'antiparticella di carica opposta
 - massa circa 200 volte maggiore dell'elettrone => decade (vita media $2.2 \mu\text{s}$)

“Scoperta” da Conversi, Pancini, Piccioni negli anni '40.



Tracce lunghe metri in esperimenti moderni



relativita' ristretta

$$\beta = (p \cdot c) / E$$

$$\gamma = E / (m \cdot c^2)$$

$$\beta\gamma = p / (m \cdot c)$$

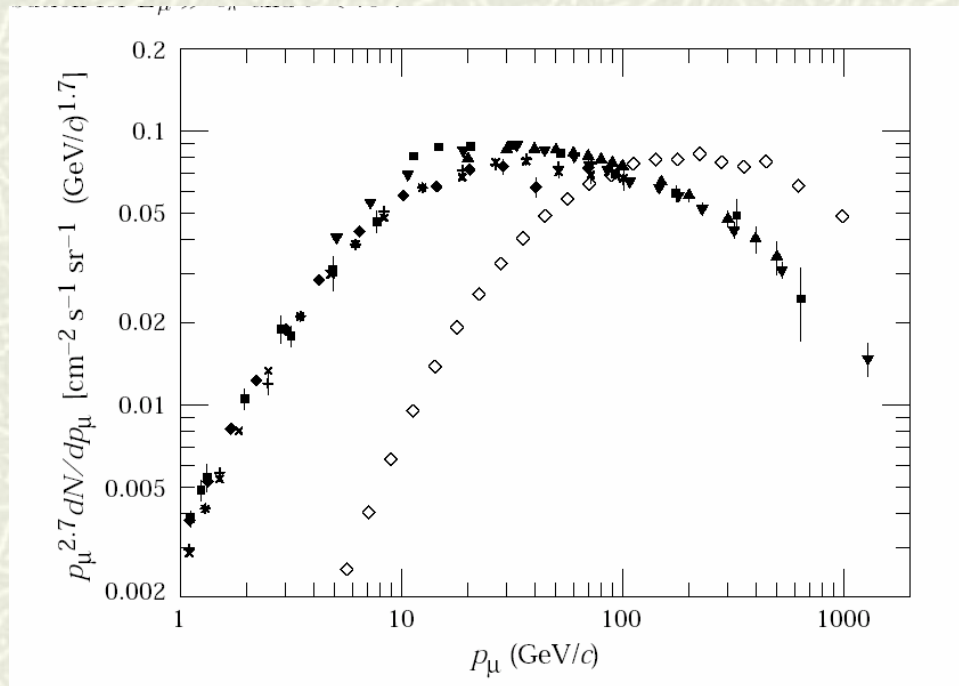
$$\tau = 2.2 \mu\text{s} \rightarrow ?$$

$$s = v \cdot \tau$$

$$s = (p/m) \cdot \tau = \beta\gamma \cdot c \cdot \tau$$

$$s_{\text{max}} = 660\text{m}$$

$$s_{\text{max}} = \beta\gamma \cdot 660\text{m}$$



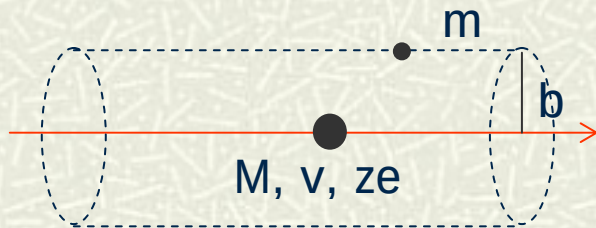
Quanto vale $\beta\gamma$ per un muone di 10 GeV? ($c=1$)

Perche' non vedo muoni sotto a 1 GeV?

Introduzione ai rivelatori a gas

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.



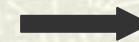
L'impulso che l'elettrone subisce e':

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

solo la componente trasversa di E conta per motivi di simmetria

Dal teorema di Gauss

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



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

Energia ceduta all'elettrone

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

Particelle cariche nella materia (II)

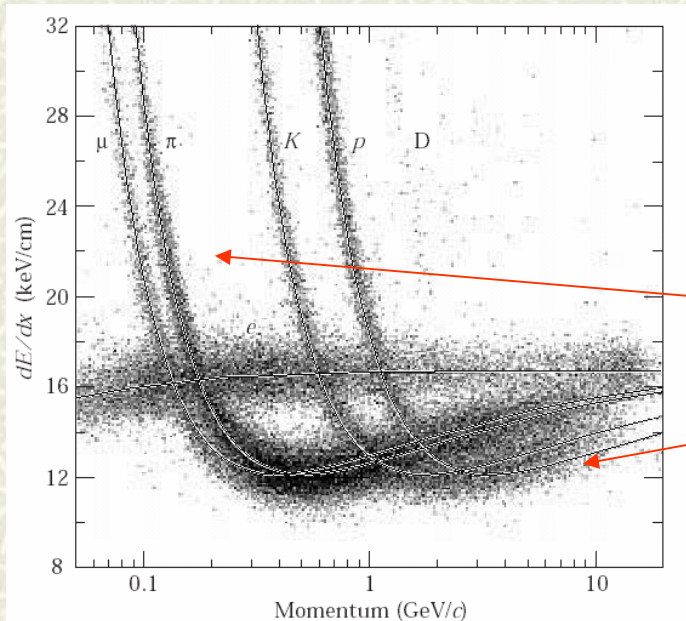
- Se consideriamo N_e il numero di elettroni per unita' di volume:

L'energia persa in un guscio cilindrico a distanza b

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

Integrando su tutto il volume

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

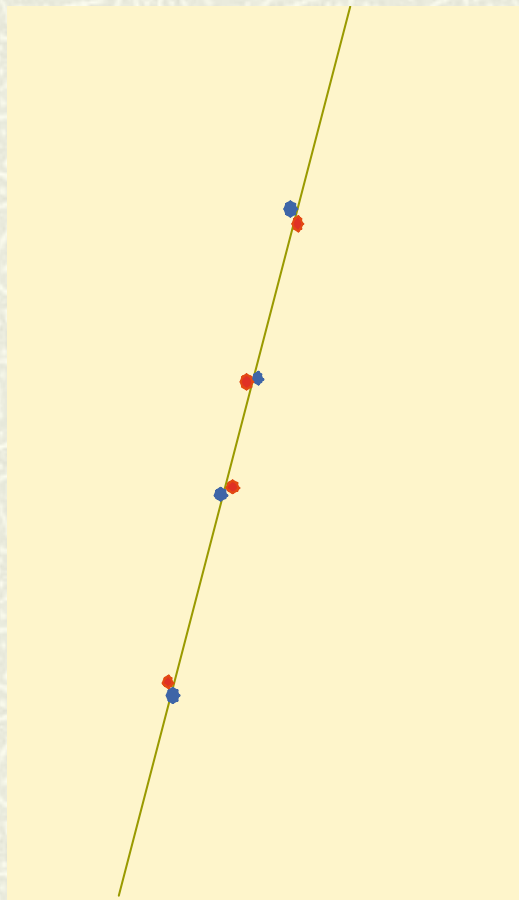


$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{z}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]$$

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 ₄	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

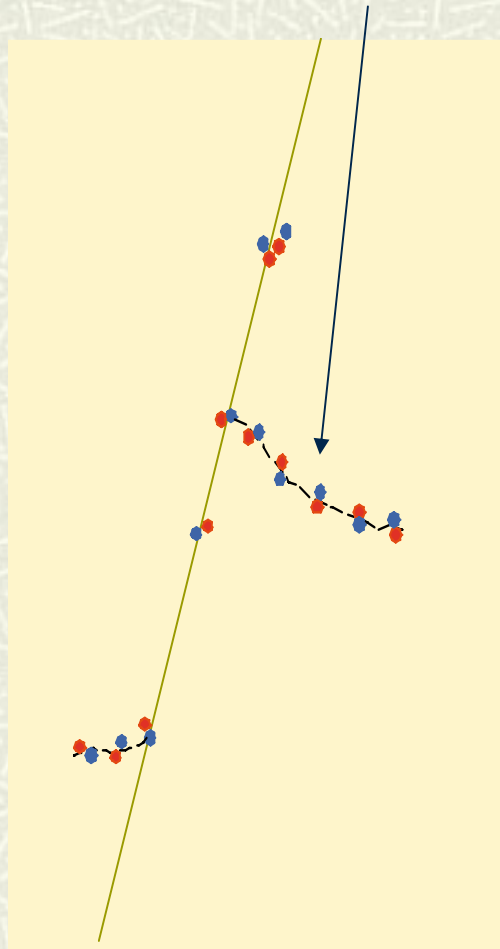
Massima efficienza di rivelazione: $\varepsilon = 1 - e^{-n}$

GAS (STP)	Spessore	ε (%)
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

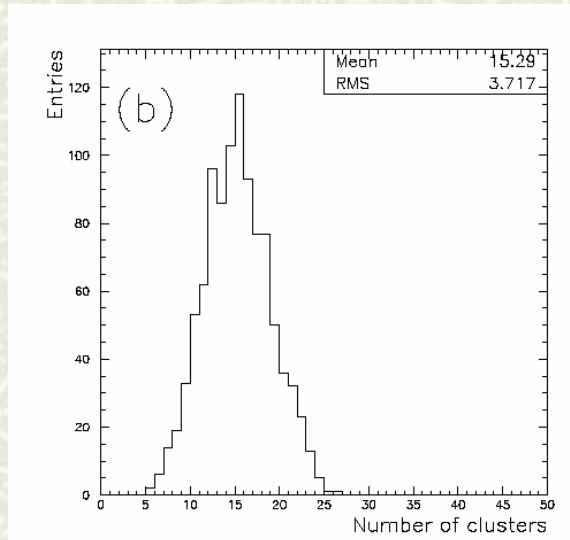


GAS (STP)	Helium	Argon	Xenon	CH ₄	DME
n (ion pairs/cm)	6	25	44	16	55
N (ion pairs/cm)	8	90	300	53	160

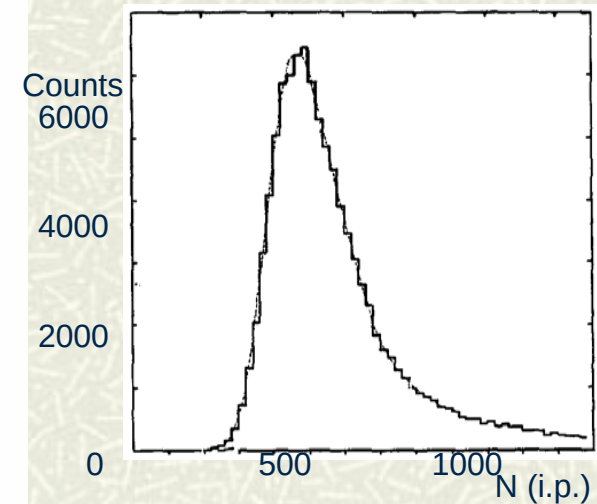
N: total ion-electron pairs

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

Distribuzione statistica del numero di cluster (Landau):



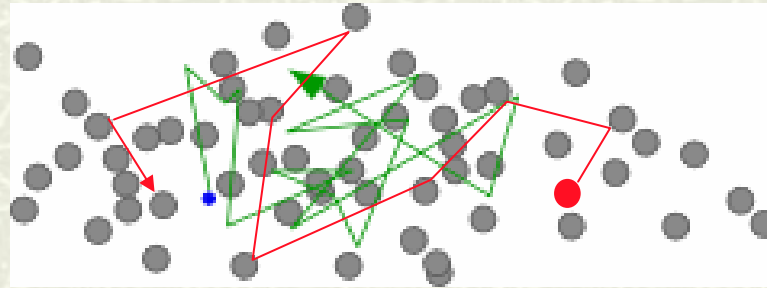
3 mm Ar/CO₂ (70-30)
1 bar



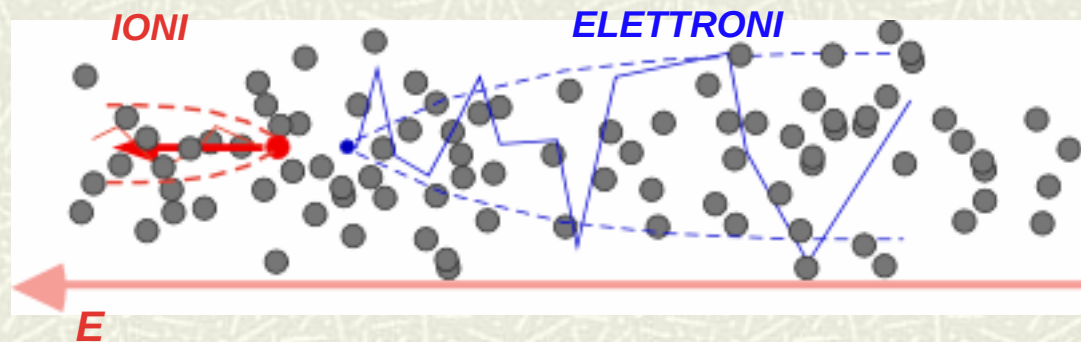
4 cm Ar-CH₄ (95-5)
5 bars

Deriva delle cariche nel gas

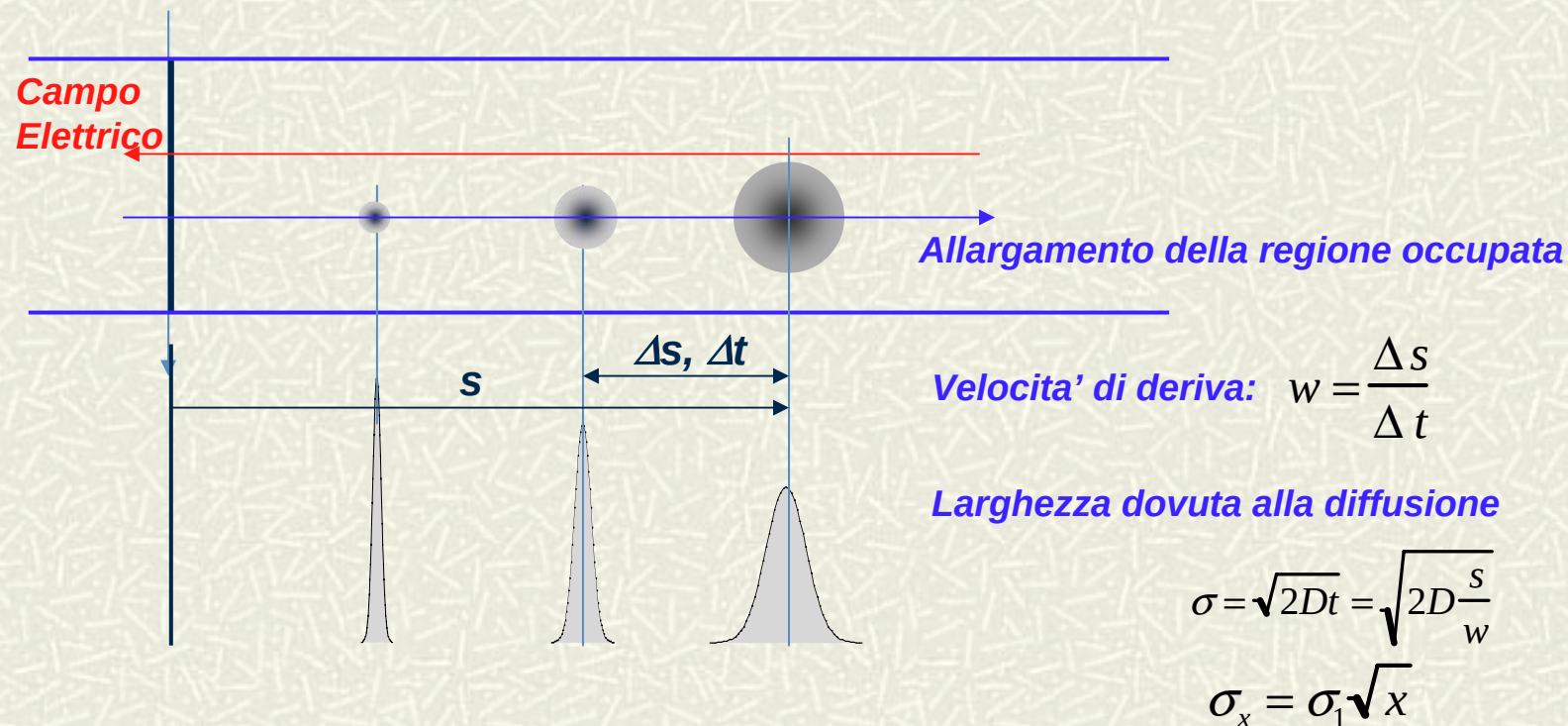
Con un campo elettrico nullo $E = 0$: “diffusione termica”



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



Deriva e diffusione degli elettroni



Espressione di Townsend per la velocita' di deriva:

$$w = \frac{e}{2m} E \tau$$

τ : tempo libero medio

L'aumento della velocita' degli elettroni fa diminuire il τ .
La velocita' di deriva satura...

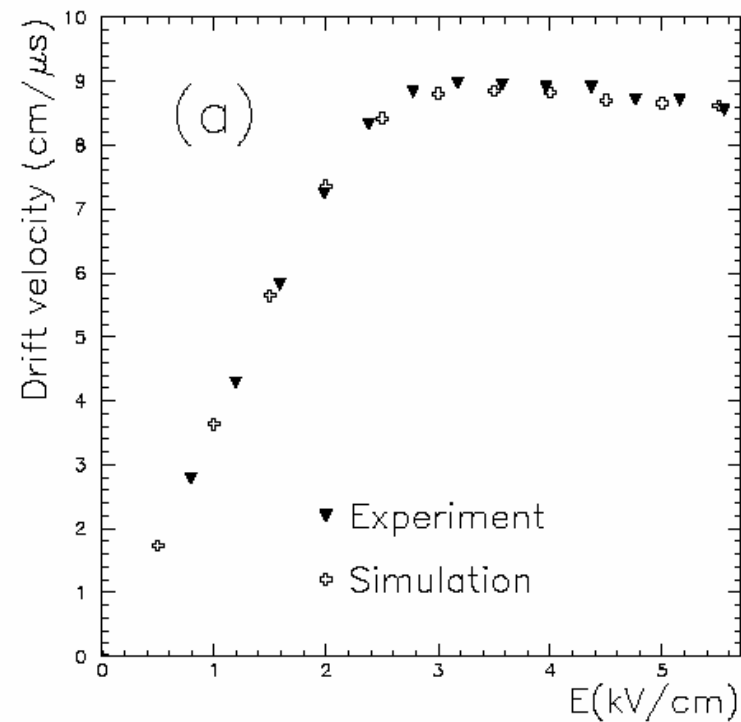
Velocita' di deriva degli elettroni

Velocita' di deriva in una miscela
Ar/CO₂/CF₄ (60/20/20).

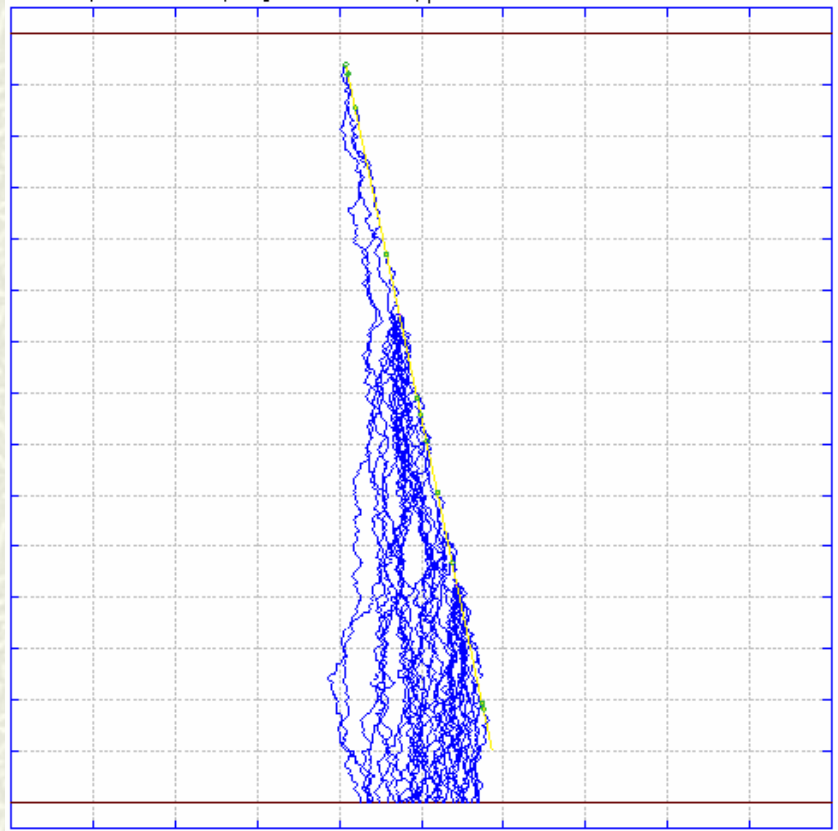
Satura a

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

3000 volte la velocita' degli ioni



Diffusione e risoluzione spaziale



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

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

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 $E_e = 100 \text{ eV}$.

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

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

α 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 ...) può limitare lo sviluppo di una valanga attraverso la cattura di elettroni liberi:

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

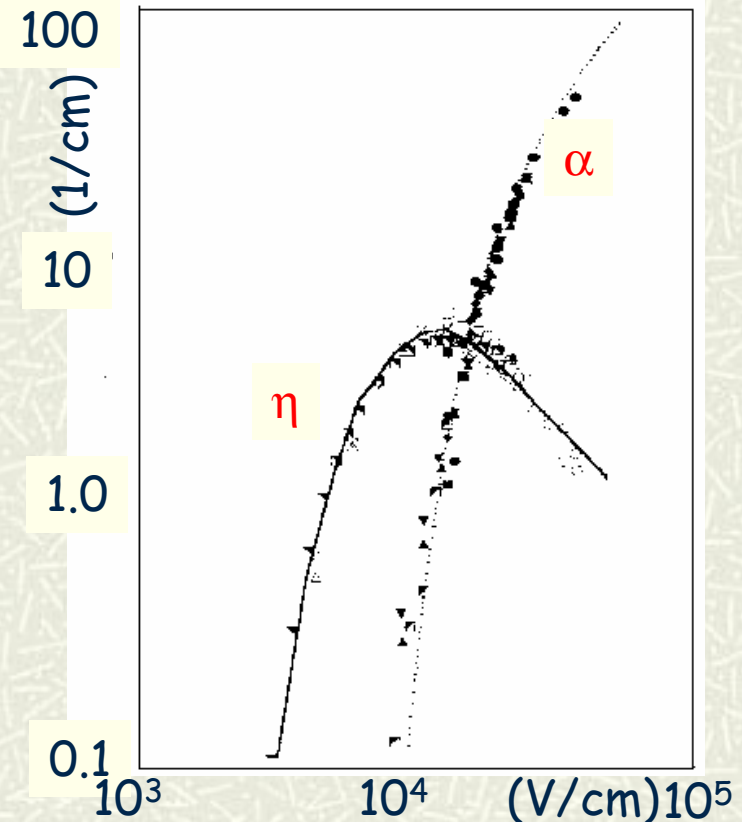
η coefficiente di attachment.

Il guadagno effettivo diventa quindi:

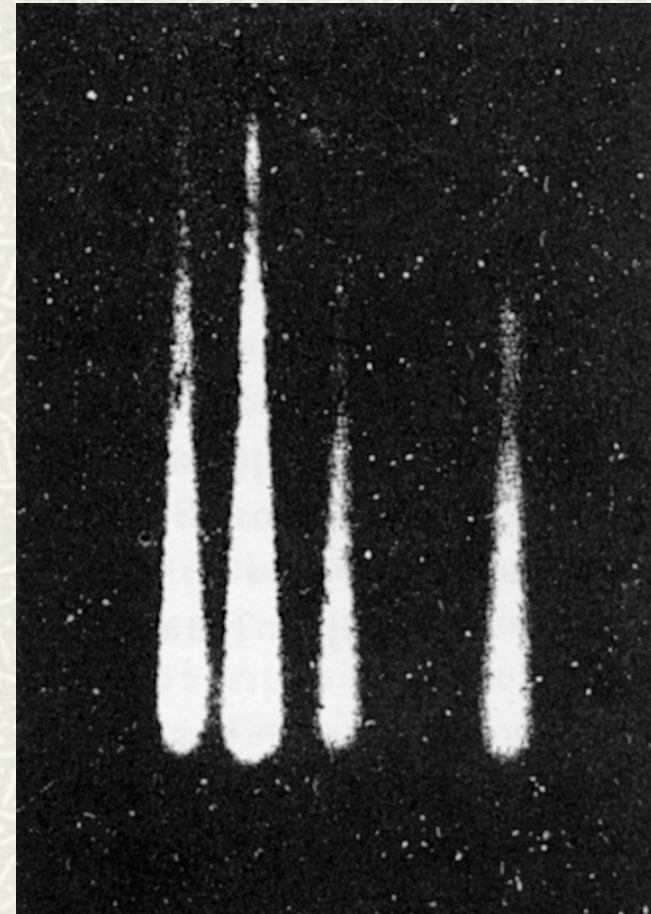
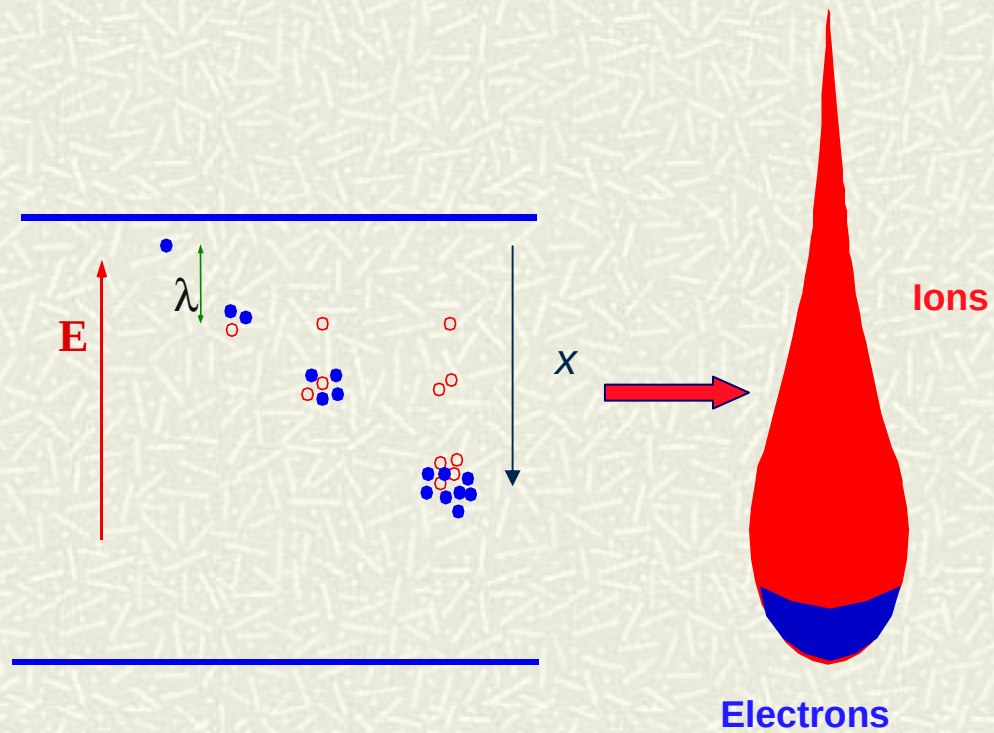
$$M = \exp \left[\int (\alpha(x) - \eta(x)) dx \right]$$

Inoltre se la densità di carica cresce molto si può 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 più di $10^7 \div 10^8$ elettroni.



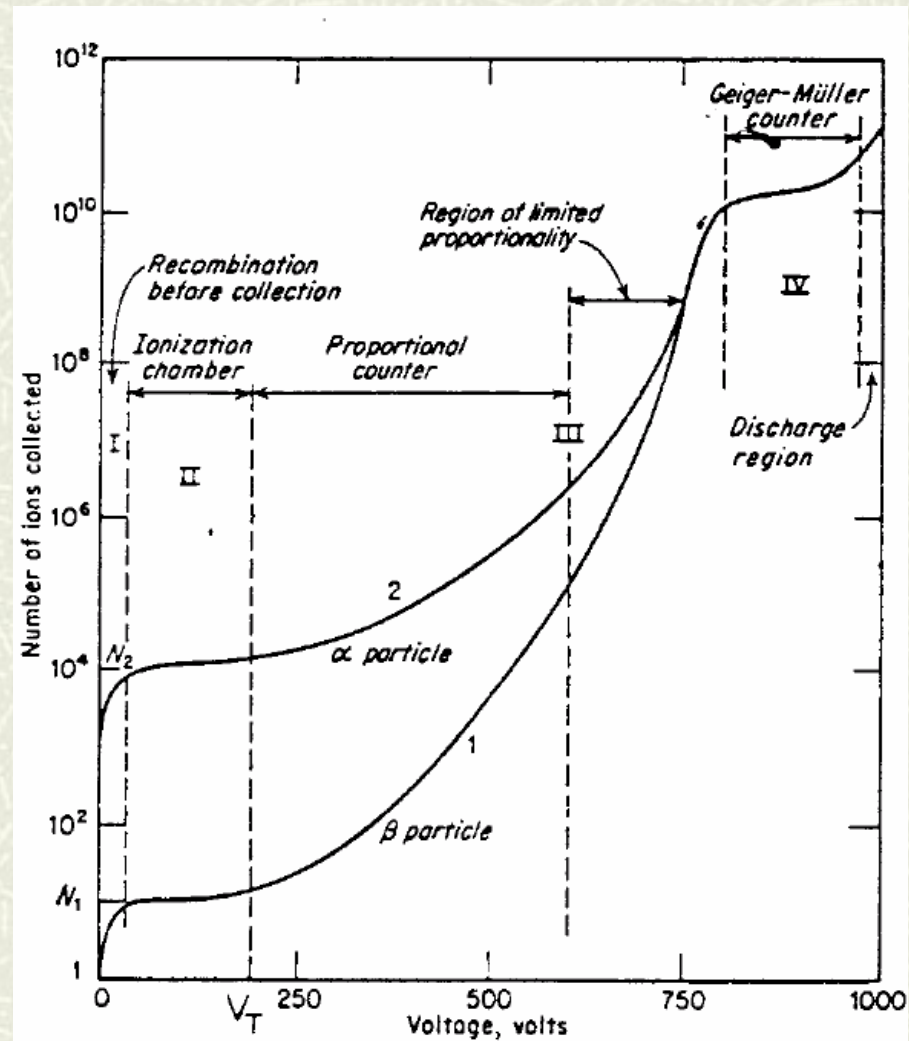
La valanga



Moltiplicazione e tensione

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

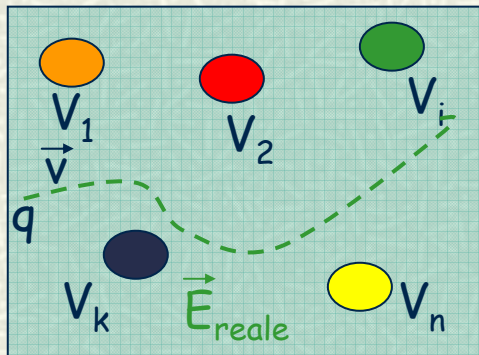
1. ricombinazione
2. ionizzazione
3. proporzionalita'
4. proporzionalita' ridotta
5. scarica.



Induzione del segnale: teorema di Ramo

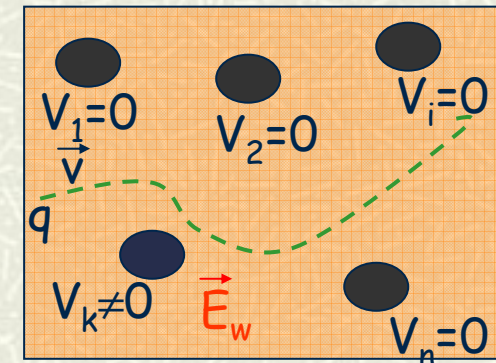
Le cariche in moto nel gas inducono una corrente sugli elettrodi che rappresenta il segnale del passaggio della particella.

Il **teorema di Ramo (1939)** permette di calcolare **la corrente indotta su un elettrodo da una carica in moto** in una qualunque configurazione di elettrodi posti a potenziale elettrico $V_1, V_2, \dots V_n$.



Si introduce il “**weighting field**” $\vec{E}_w$ ottenuto ponendo:

$$\begin{aligned} V_{i \neq k} &= 0 \\ V_k &\neq 0 \end{aligned}$$



Il teorema di Ramo afferma che la **corrente indotta dalla carica q sull'elettrodo k** è:

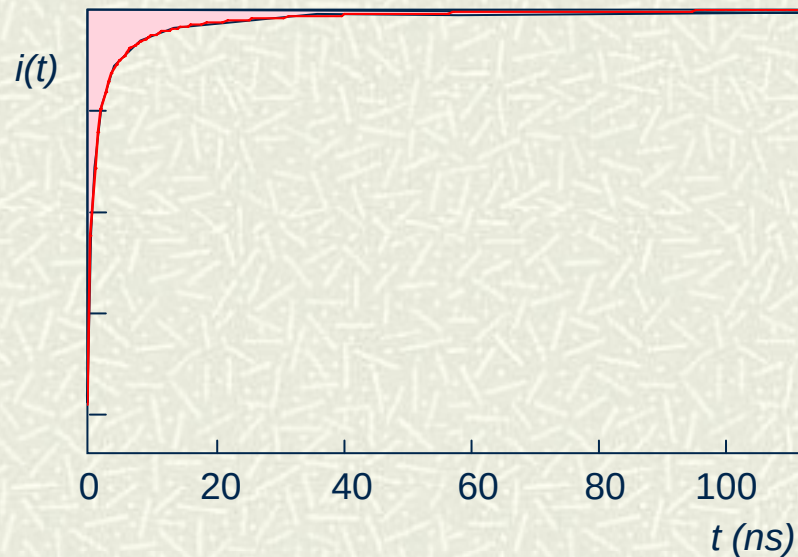
$$I_k = -q \frac{\vec{v} \times \vec{E}_w}{V_k}$$

Elettronica di lettura

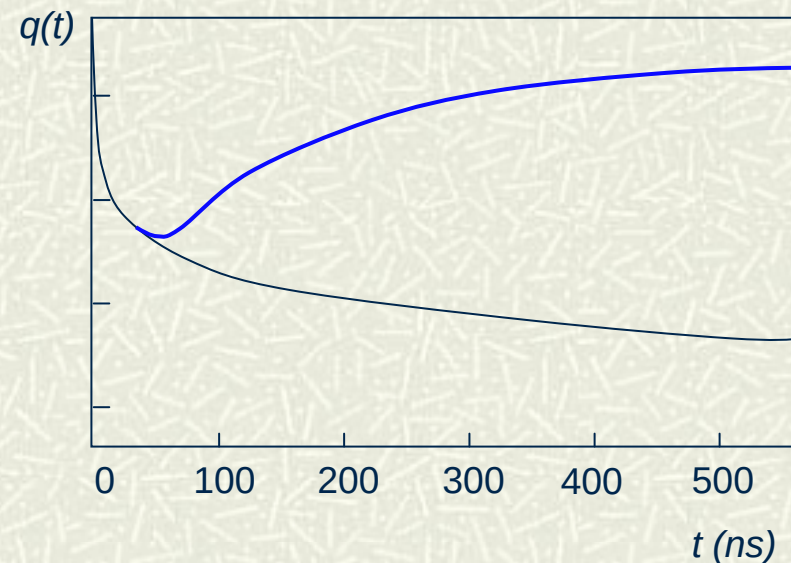
Solitamente il segnale indotto dalle cariche in moto viene inviato ad una elettronica di lettura che:

- Integra la parte iniziale del segnale;
- Amplifica il segnale stesso;
- Deriva la parte finale.

Segnale in corrente:

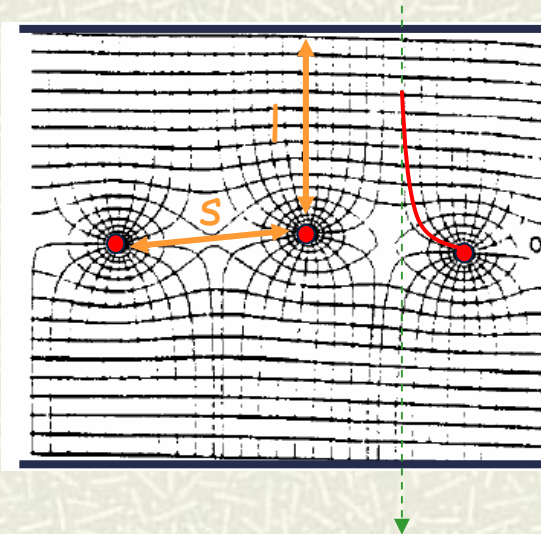


Segnale in uscita dall'elettronica;



Camere proporzionali a multifilo (MWPC)

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



Nella zona lontana dai fili il campo e' praticamente uniforme:

$$E = cV_0/2\varepsilon_0 s$$

e fa derivare gli elettroni.

In prossimita' dei fili il campo e' quello tipico di un condensatore cilindrico:

$$E = (cV_0/2\varepsilon_0) \times (1/r)$$

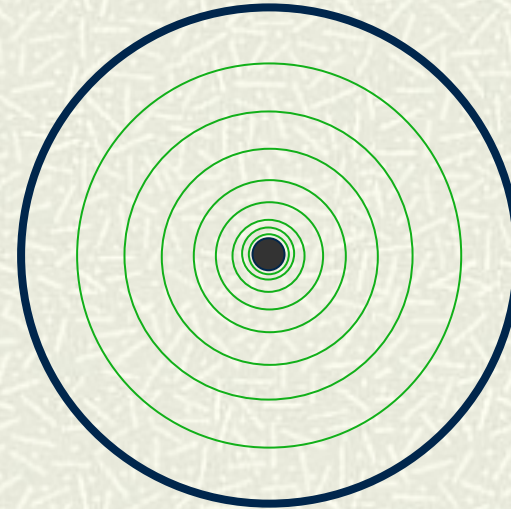
A causa della dipendenza inversa dalla distanza, a qualche decina di μm dal filo si innesca un processo di moltiplicazione a valanga:

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

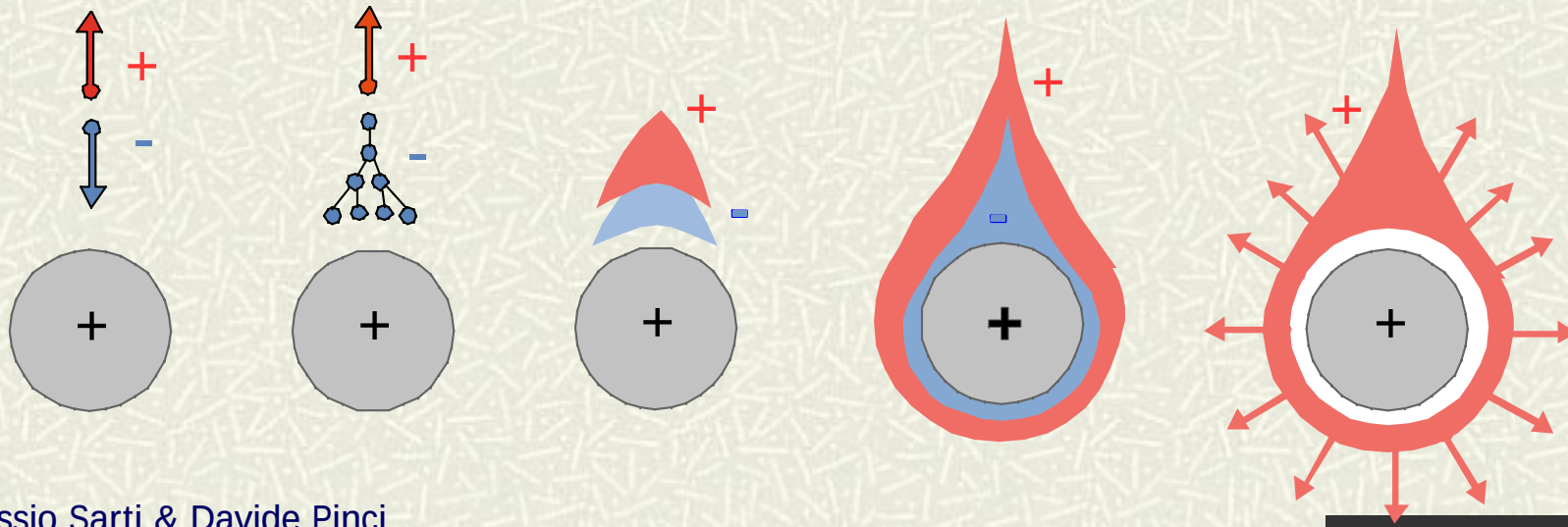
Valanga sul filo

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



Prestazioni temporali

La risoluzione temporale e' legata a due termini:

✓ la fluttuazione della posizione della traccia rispetto al filo:

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

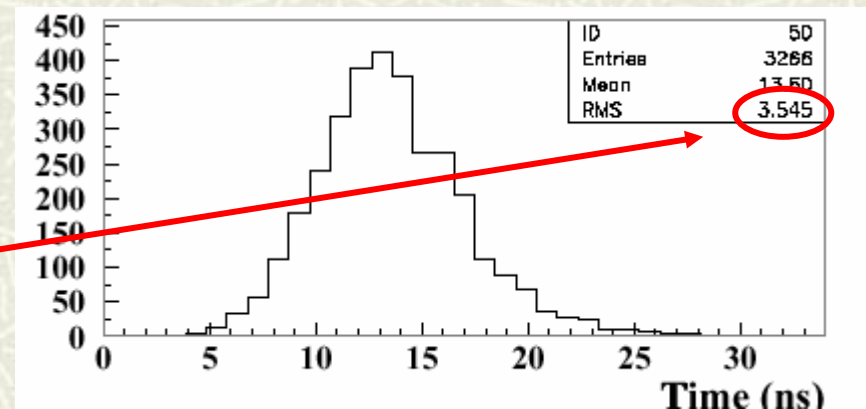
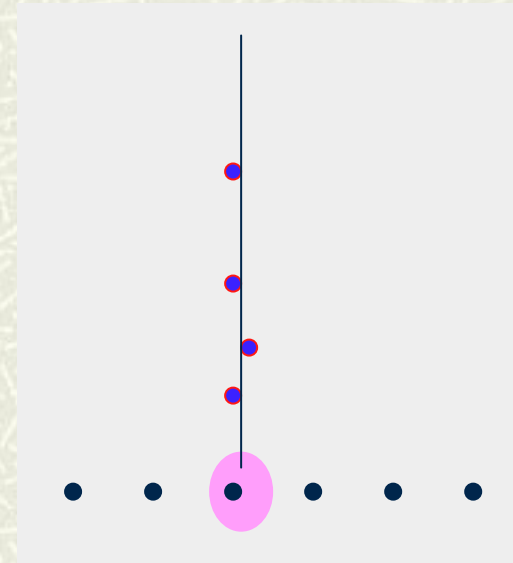
✓ la fluttuazione della posizione lungo la traccia del cluster piu' vicino al filo:

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

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

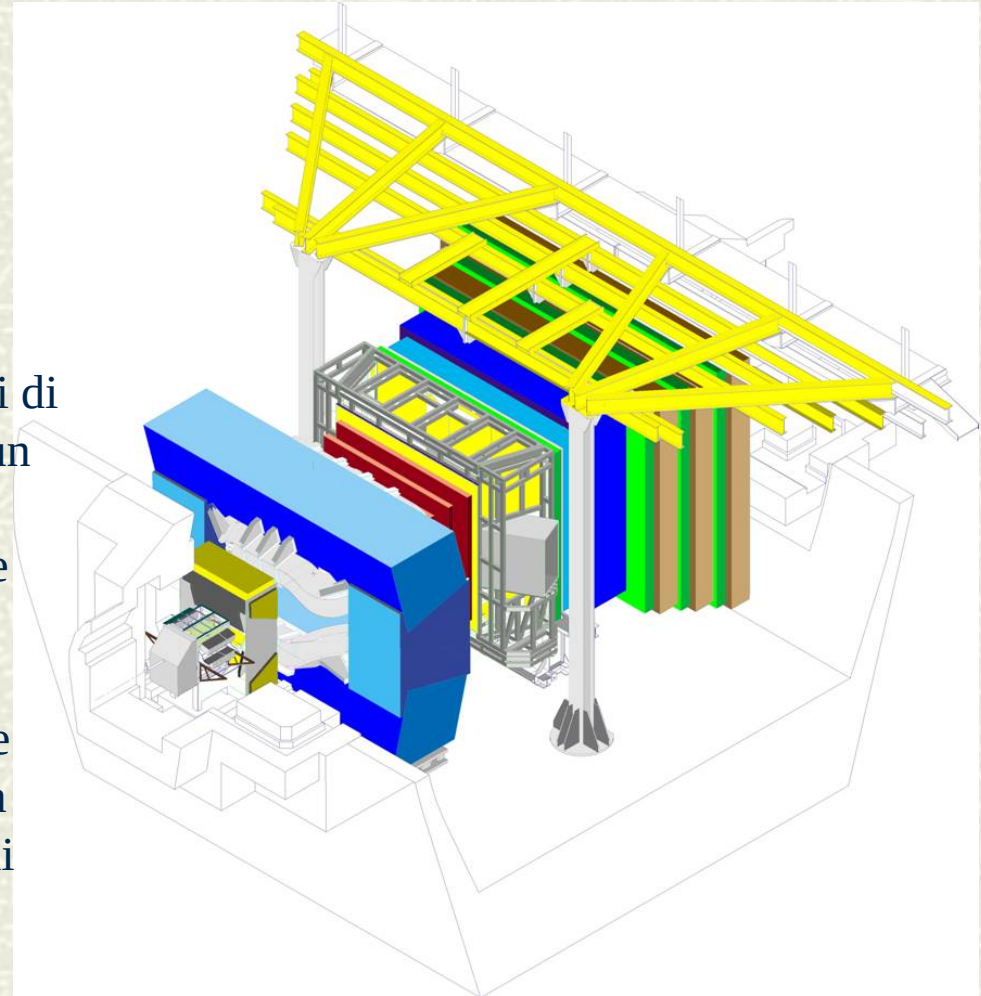


L'esperimento LHCb

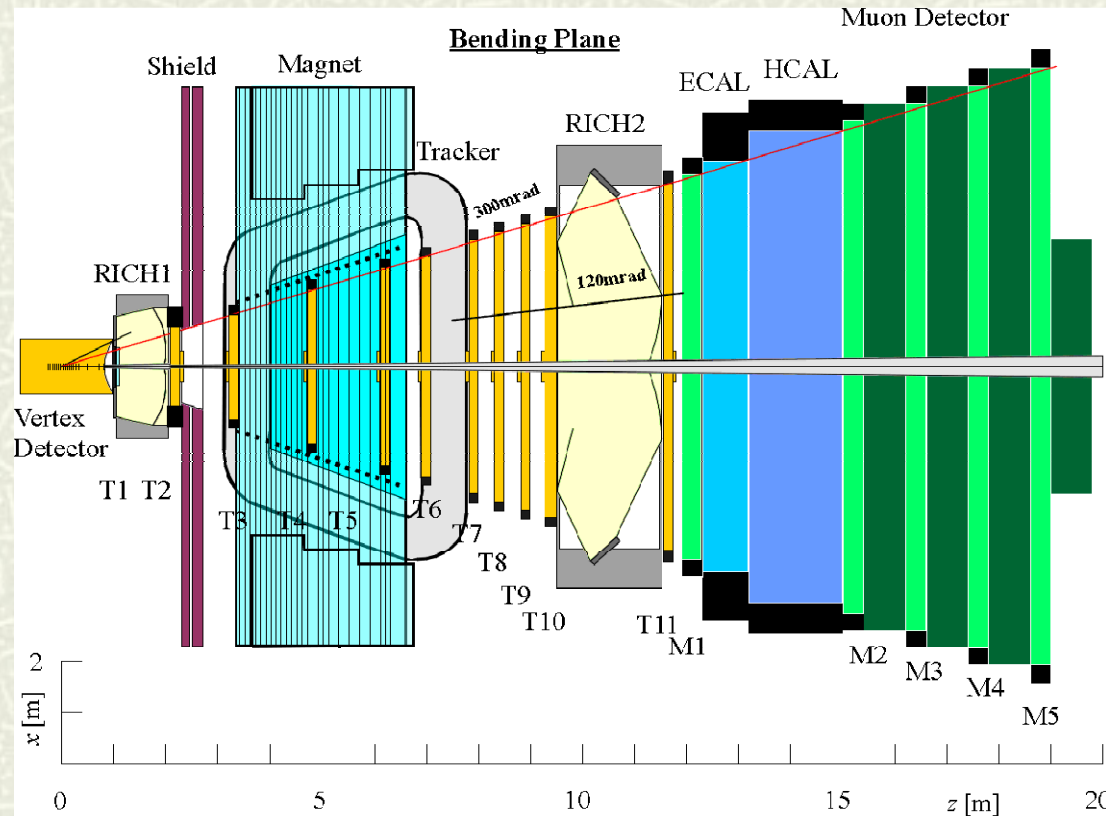
Al CERN protoni collidono contro altri protoni ogni 25ns. I decadimenti delle particelle prodotte nella collisione vengono osservati con dei rivelatori “compositi” (rivelatori di particelle cariche e neutre, al silicio, a gas o a luce Cerenkov)

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 μ e' stato progettato un rivelatore specifico....



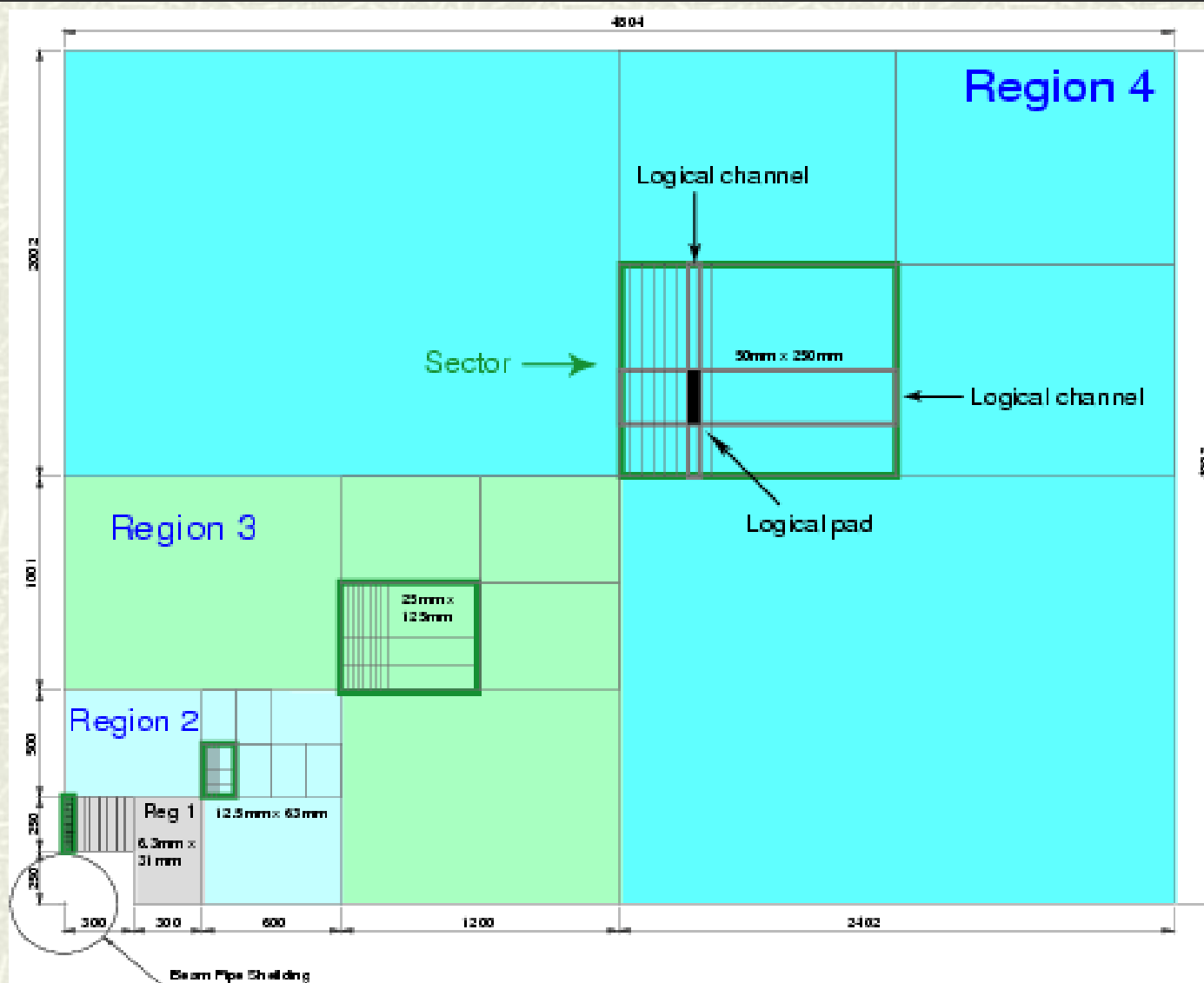
Trigger di muoni in LHCb



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 è un segnale in coincidenza, nella finestra temporale di 25 ns, in una zona spaziale che viene selezionata in corrispondenza all'impulso del muone.

Rivelatore di muoni in LHCb



Alessio Sarti & Davide Pinci

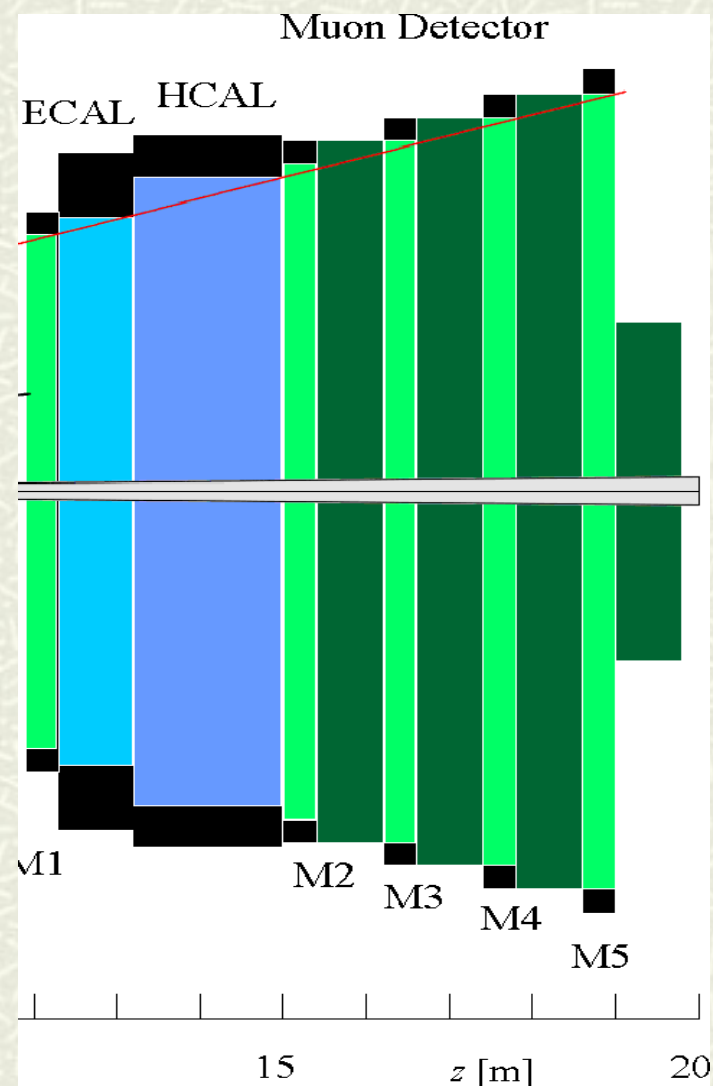
Granularita' da $1 \times 2\text{ cm}$ a $10 \times 20\text{ cm}$.

Rivelatore di muoni in LHCb

Quali sono le caratteristiche che deve avere il rivelatore per i muoni?

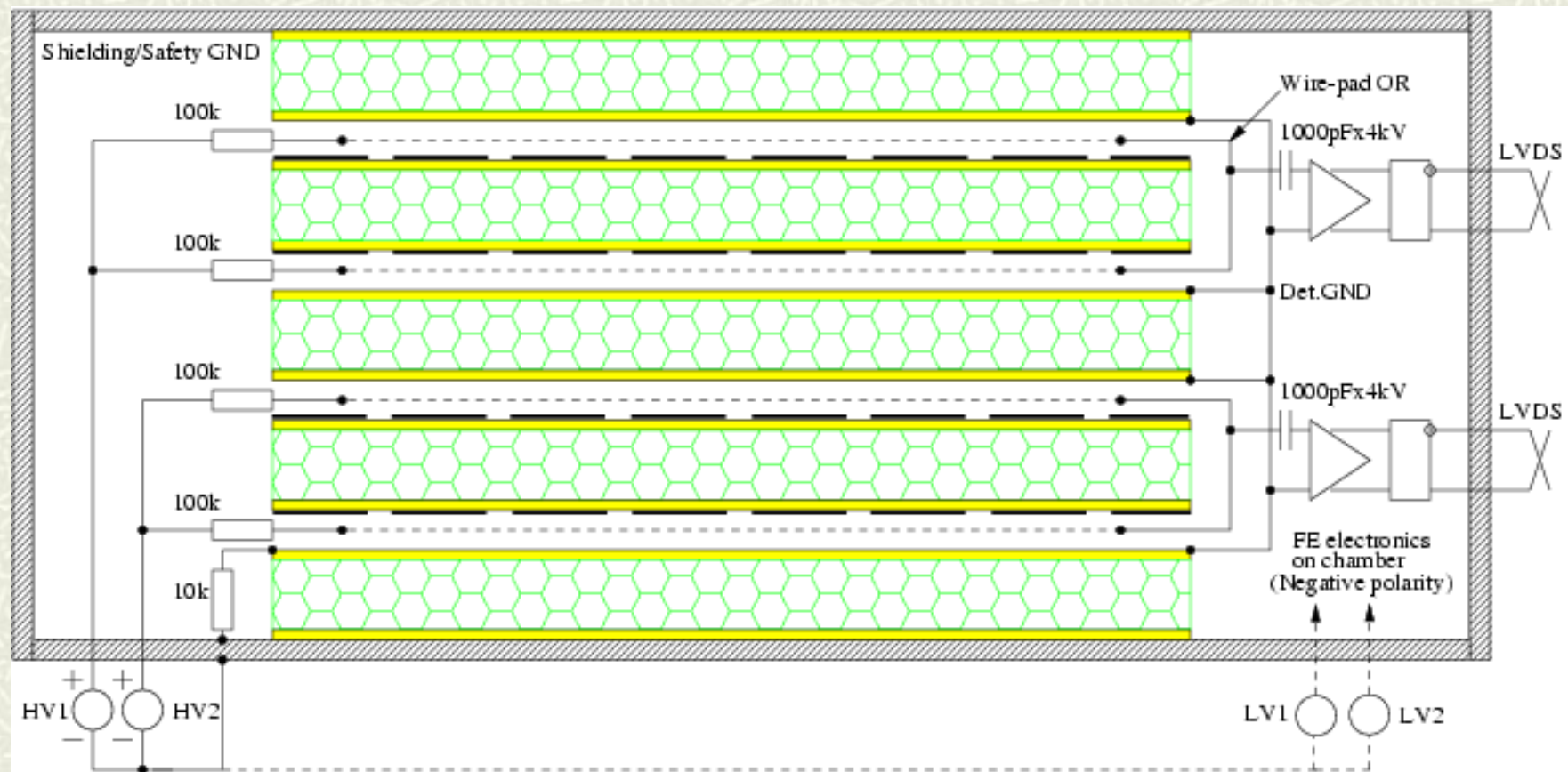
- ✓ Rivelatore di particelle cariche
- ✓ Rapidità nel raccogliere il segnale ($< 25\text{ns}$)
- ✓ Buona risoluzione spaziale (basso cross-talk)

Soluzione operativa proposta:
Rivelatore a GAS, situato dopo il calorimetro. Delle due soluzioni proposte (RPC, Resistive Plate Chambers o MWPC Multi Wire Proportional Chambers) e' stata preferita la soluzione con le MWPC (migliori performances in caso di elevato flusso di particelle).



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:

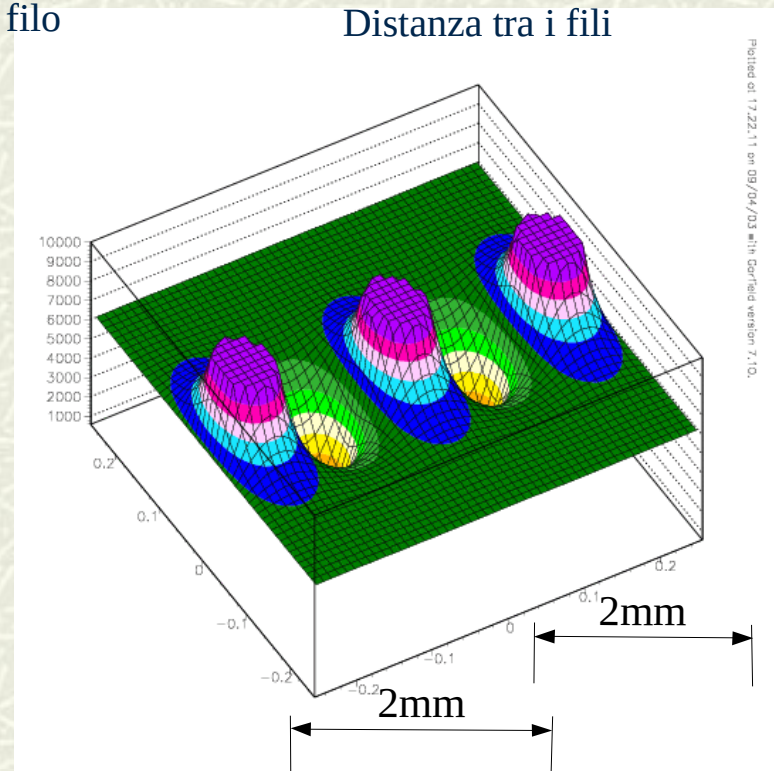
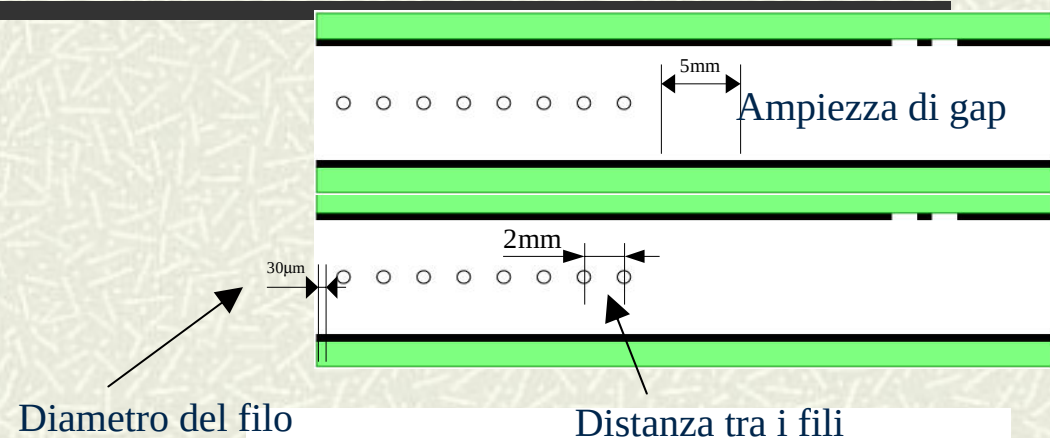
$E_a: 262.39\text{kV/cm}$

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

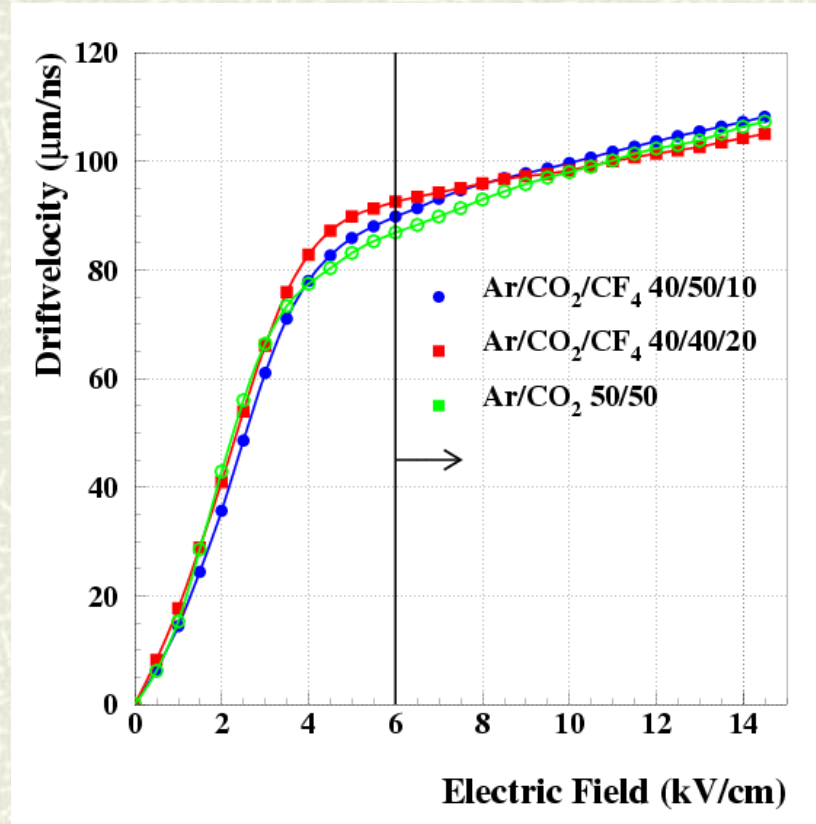
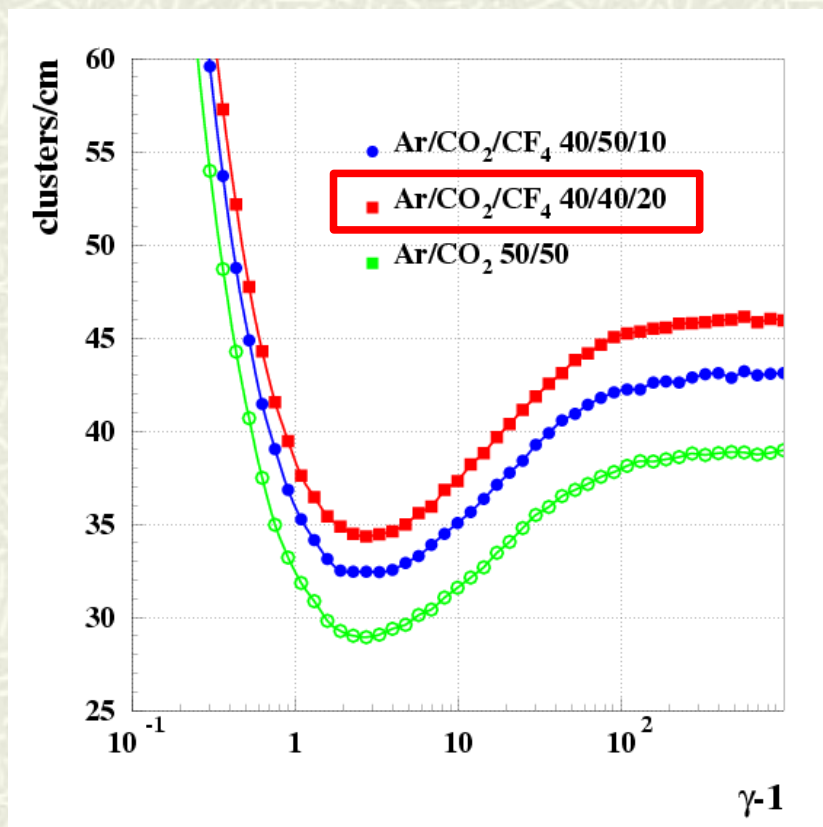
Guadagno : 10^5

δV : caduta di potenziale dovuta alla
carica spaziale: trascurabile

Simulazione del
campo elettrico



Gas utilizzato nelle MWPC di LHCb



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

~ 40 clusters/cm
 ~ 2.38 e⁻/cluster,
 ~ 107 e⁻/cm

Alessio Sarti & Davide Pinci

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

Tolleranze meccaniche nel processo di costruzione

Considerato che la velocità di drift **ha una debole dipendenza** dal campo elettrico particolare attenzione va dedicata alle **variazioni di guadagno del gas** che potrebbero spostare il punto di lavoro al di fuori del plateau.

Una richiesta ragionevole è quella di chiedere che il guadagno vari per meno del 25% rispetto al suo valore nominale all'interno di una singola gap:

$$0.8G_0 < G < 1.25G_0$$

In una regione piccola della camera è comunque possibile avere variazioni maggiori (50%, nel 5% dell'area).

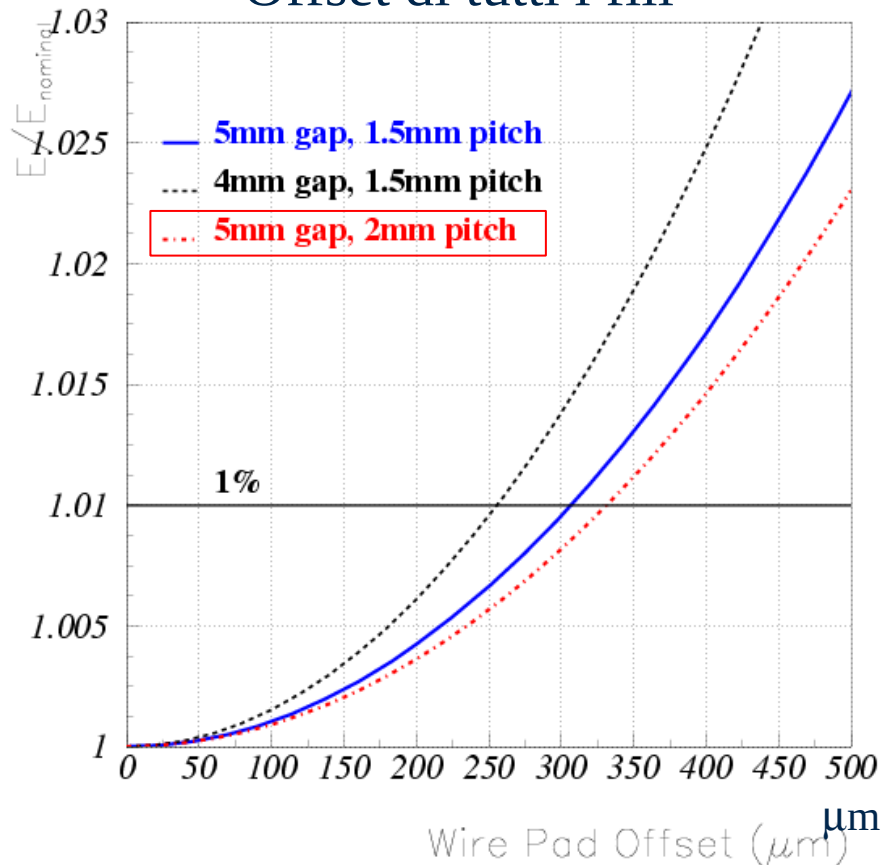
Una variazione nel guadagno del gas corrisponde ad una variazione di tensione:

$$25(50)\% \Delta G \rightarrow 1.25(2.25)\% \Delta V \rightarrow 35(65)V \text{ per } V = 2750.$$

Per mantenere il guadagno entro il limite di tolleranza, le imperfezioni meccaniche che determinano il ΔV devono essere $< 1.25(2.25)\%$

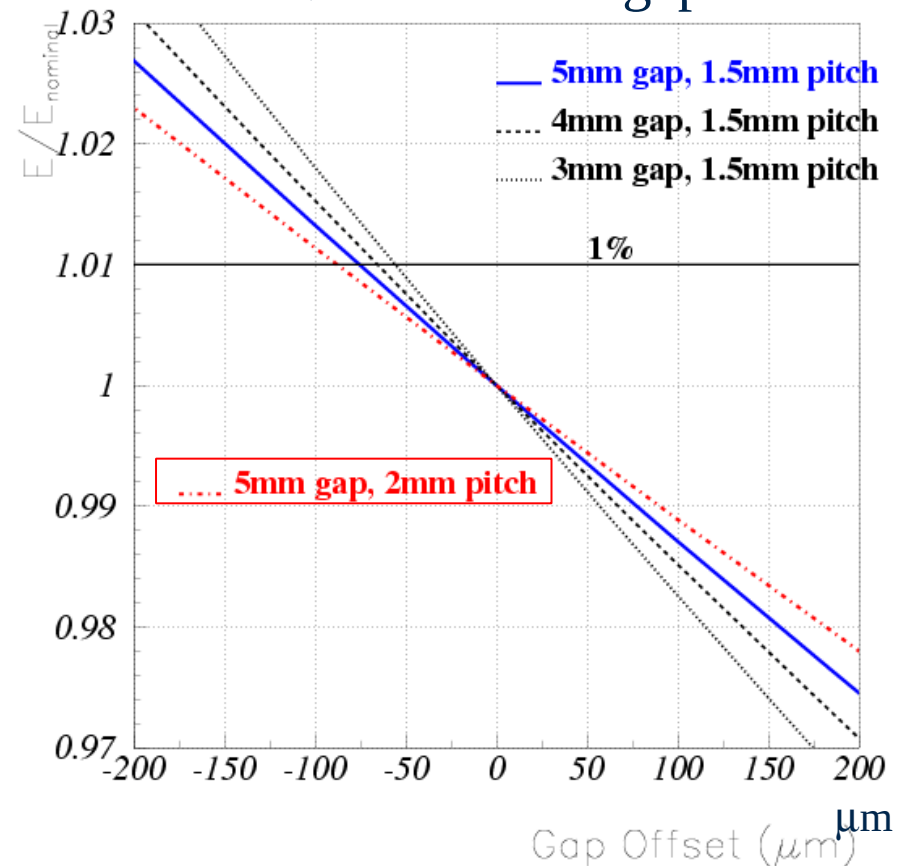
Tolleranze meccaniche: distanza filo catodo e ampiezza di gap

Offset di tutti i fili



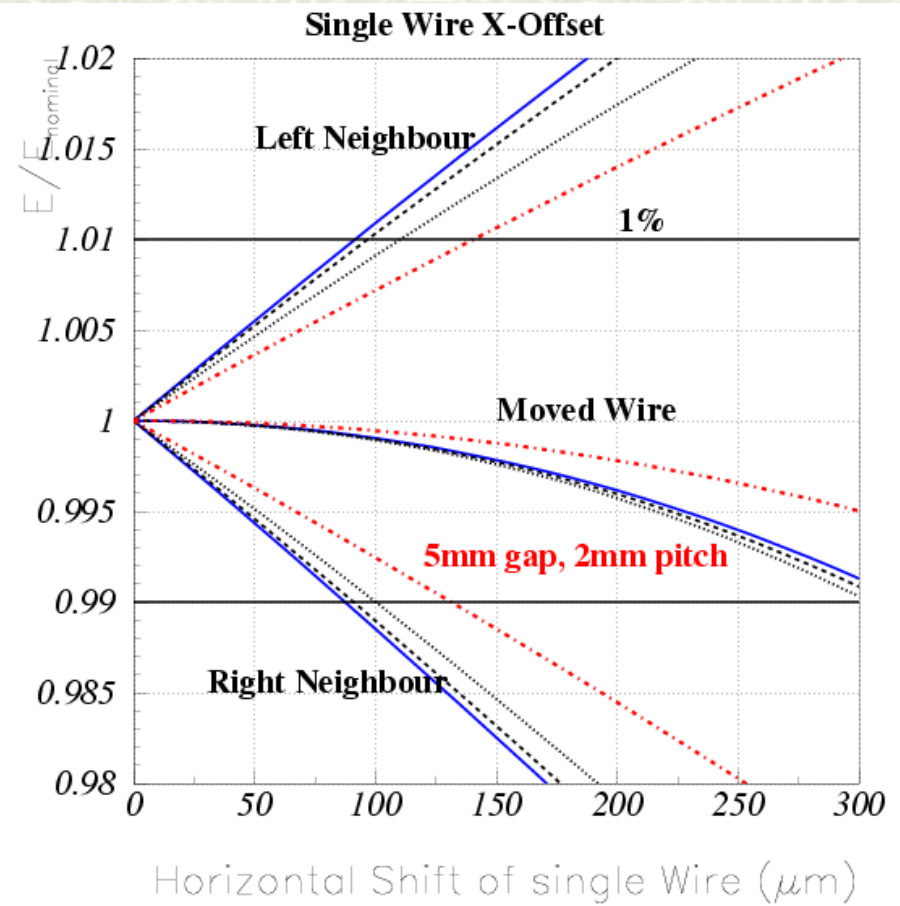
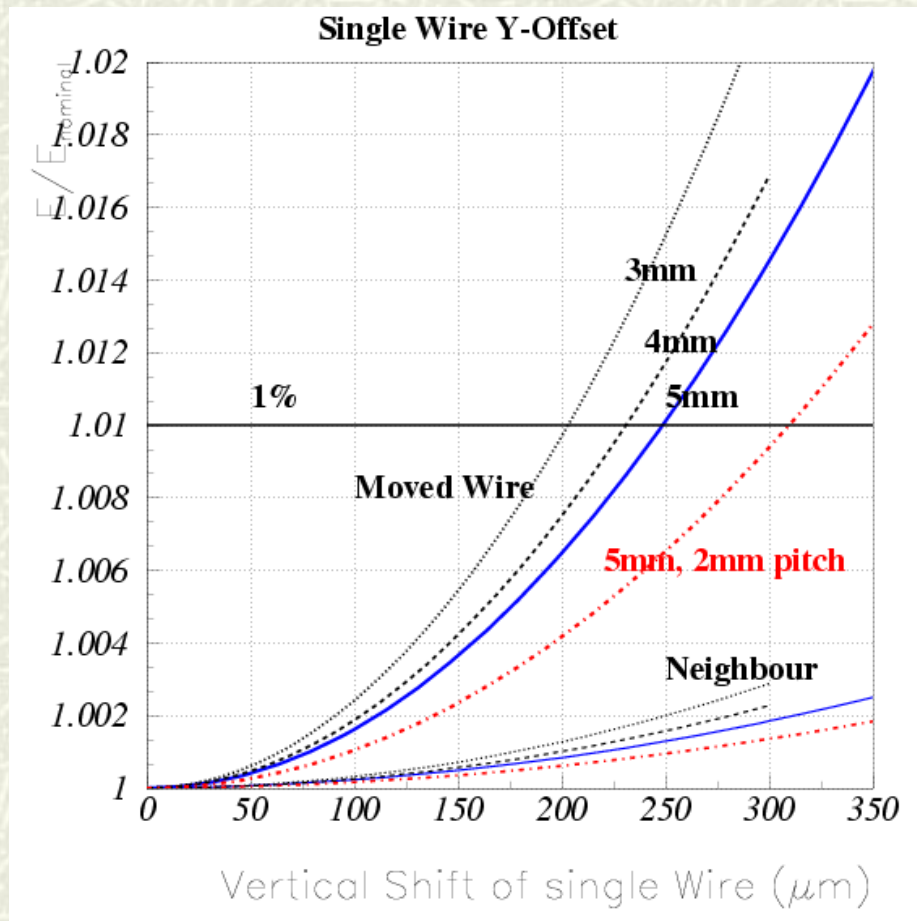
L'intero piano di fili deve essere posizionato ad una distanza dal catodo con precisione $>$ di $\sim 300\mu m$

Variazione di gap



La distanza catodo catodo deve rimanere costante e con variazioni minori di $\sim 120mm$

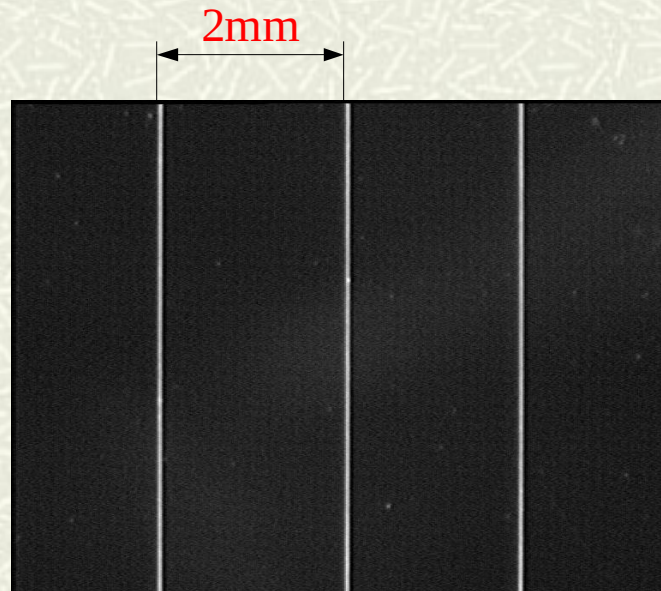
Tolleranze meccaniche: posizionamento dei singoli fili



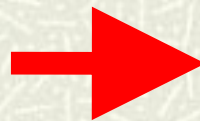
Ogni singolo filo deve essere posizionato con una precisione > di 350 μm lungo y (distanza dal catodo) e > di 170 μm lungo x (passo dei fili)

Controllo del posizionamento dei fili (passo)

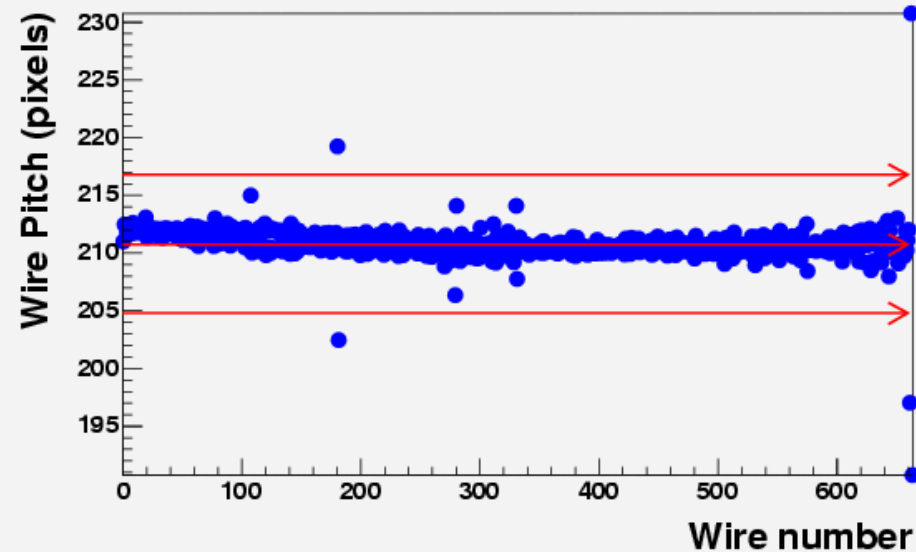
Lo scan fotografico dei fili permette
di risalire a misure di distanza



Le tolleranze vengono
verificate costruendo un
istogramma dei risultati

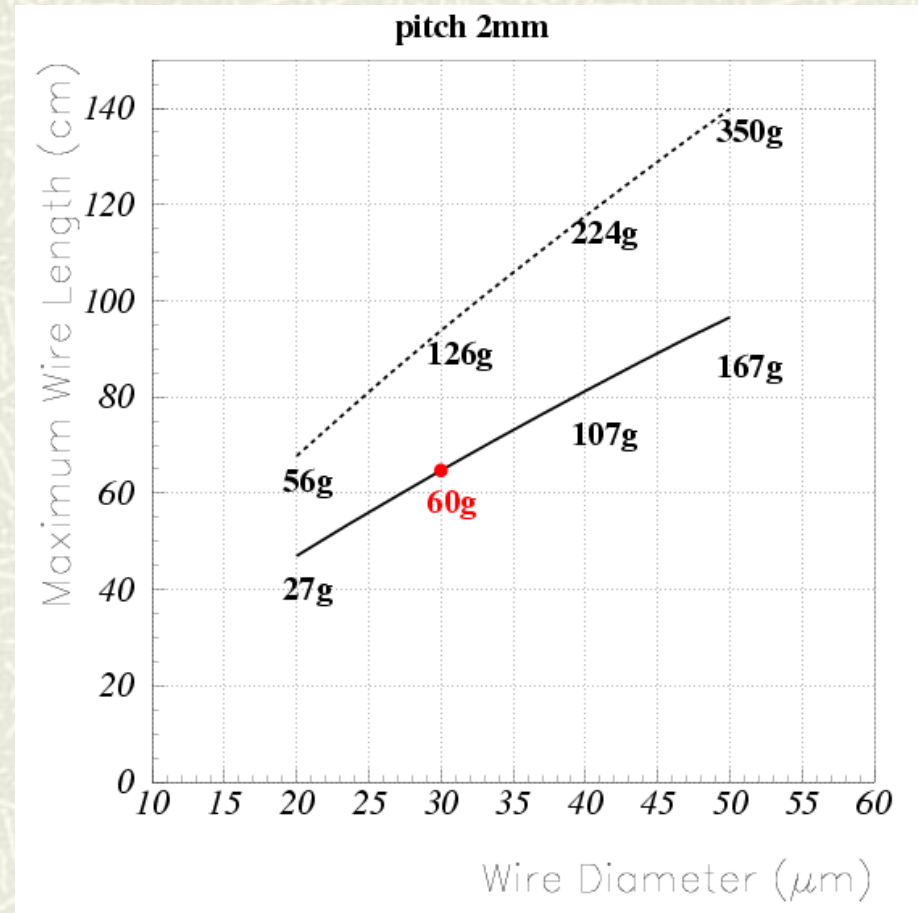


Wire Pitch vs Wire Number. Layer P1571_C055L2



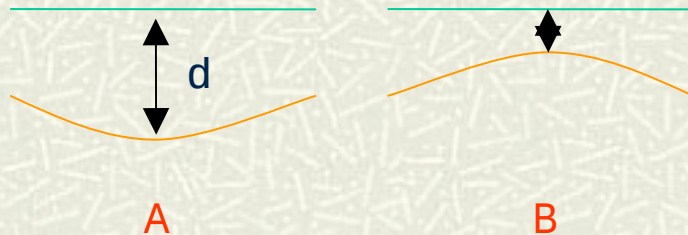
Tolleranze meccaniche: tensionamento dei singoli fili

Viene utilizzato un filo tensionato a 60g (meta' del limite di elasticita') con diametro 30 μ m. Per un guadagno del gas pari a 10^6 la massima lunghezza tollerata sarebbe 65 cm: utilizzando fili lunghi ~30cm si e' ragionevolmente nei limiti di sicurezza. Le camere sono posizionate verticalmente, quindi la curvatura del filo dovuta alla gravita' non e' un problema. Una tensione di 50g, come limite minimo, e' un ragionevole compromesso per evitare instabilita' o asimmetrie (oscillazioni) nella gap del campo elettrico.



Controllo del tensionamento dei fili: teoria

La misura della tensione e' ricavata misurando la capacita' tra: **il filo della camera (di raggio a)** forzato ad oscillare ad una frequenza ν ed un **filo sensore (di raggio b)**:



La dipendenza della capacita' dalla distanza d e':

$$C(d) = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(d^2/ab)}$$

Durante ogni oscillazione noi misuriamo le frequenze di risonanza (ω_A e ω_B) di un circuito LC caratterizzato da $C_{\text{tot}} = C_0 + C(d)$ nelle configurazioni **A** e **B**:

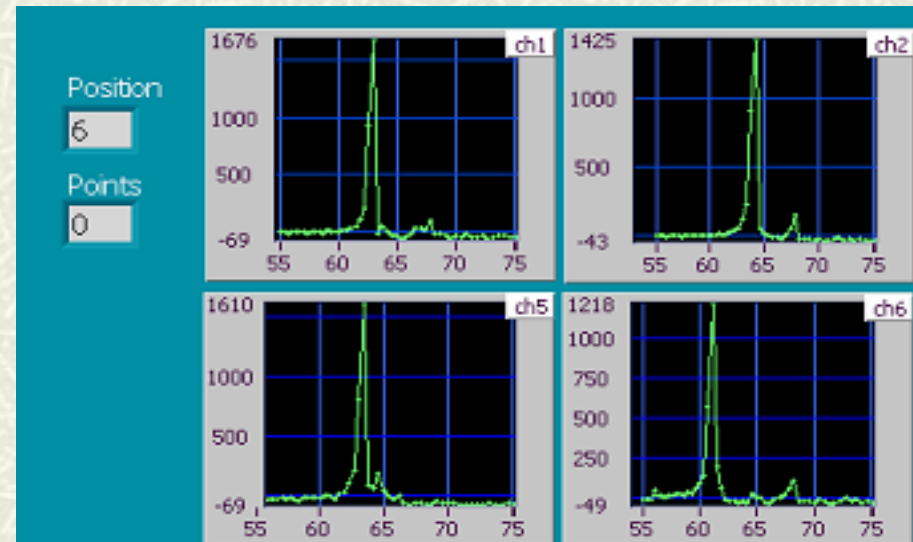
$\Delta\omega = \omega_A - \omega_B$ e' una funzione dell'ampiezza di oscillazione del filo.

Variando ν si trova la frequenza di risonanza del filo ν_0 che massimizza $\Delta\omega$

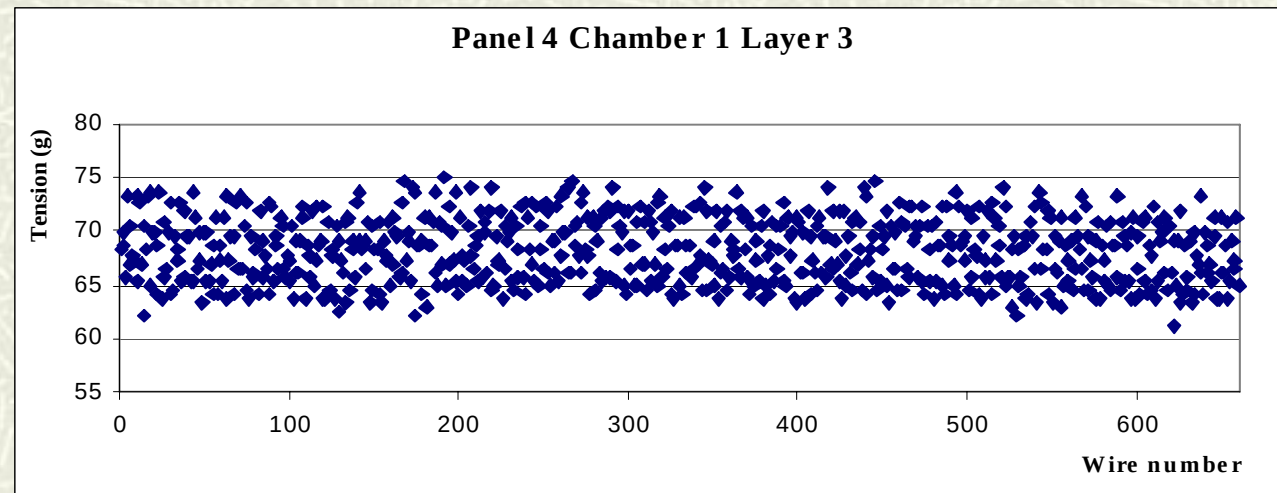


Controllo del tensionamento dei fili: risultati

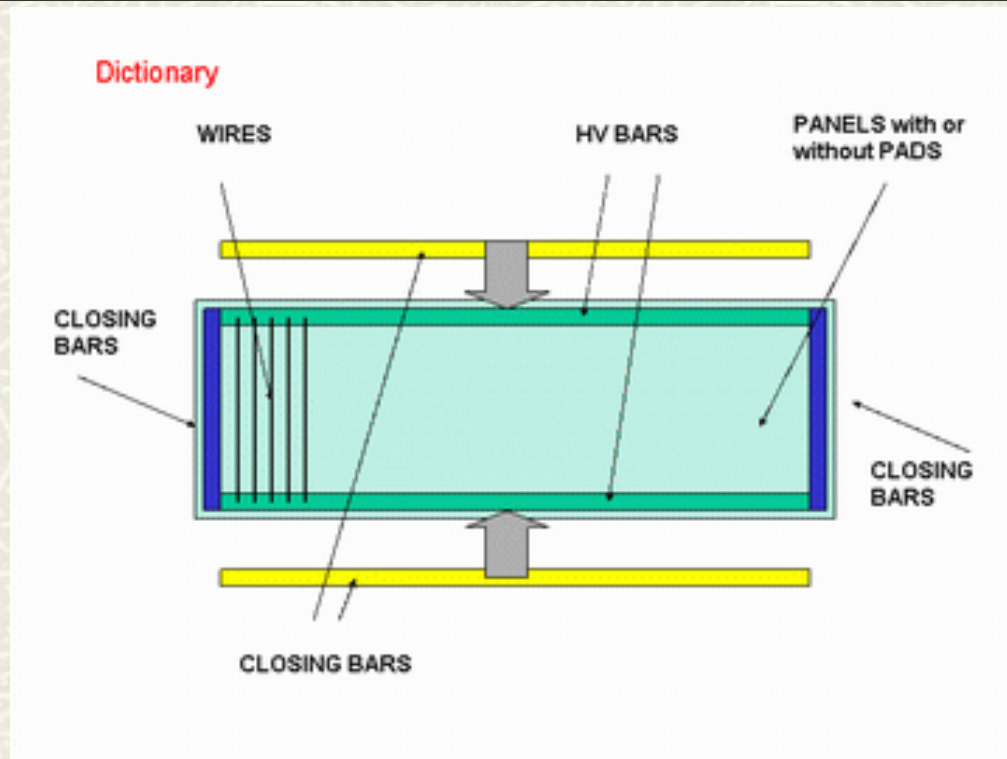
Gli spettri di segnale (v_0) ottenuti sono del tipo:



Le tolleranze vengono verificate costruendo un istogramma dei risultati



Tecnica di assemblaggio delle MWPC



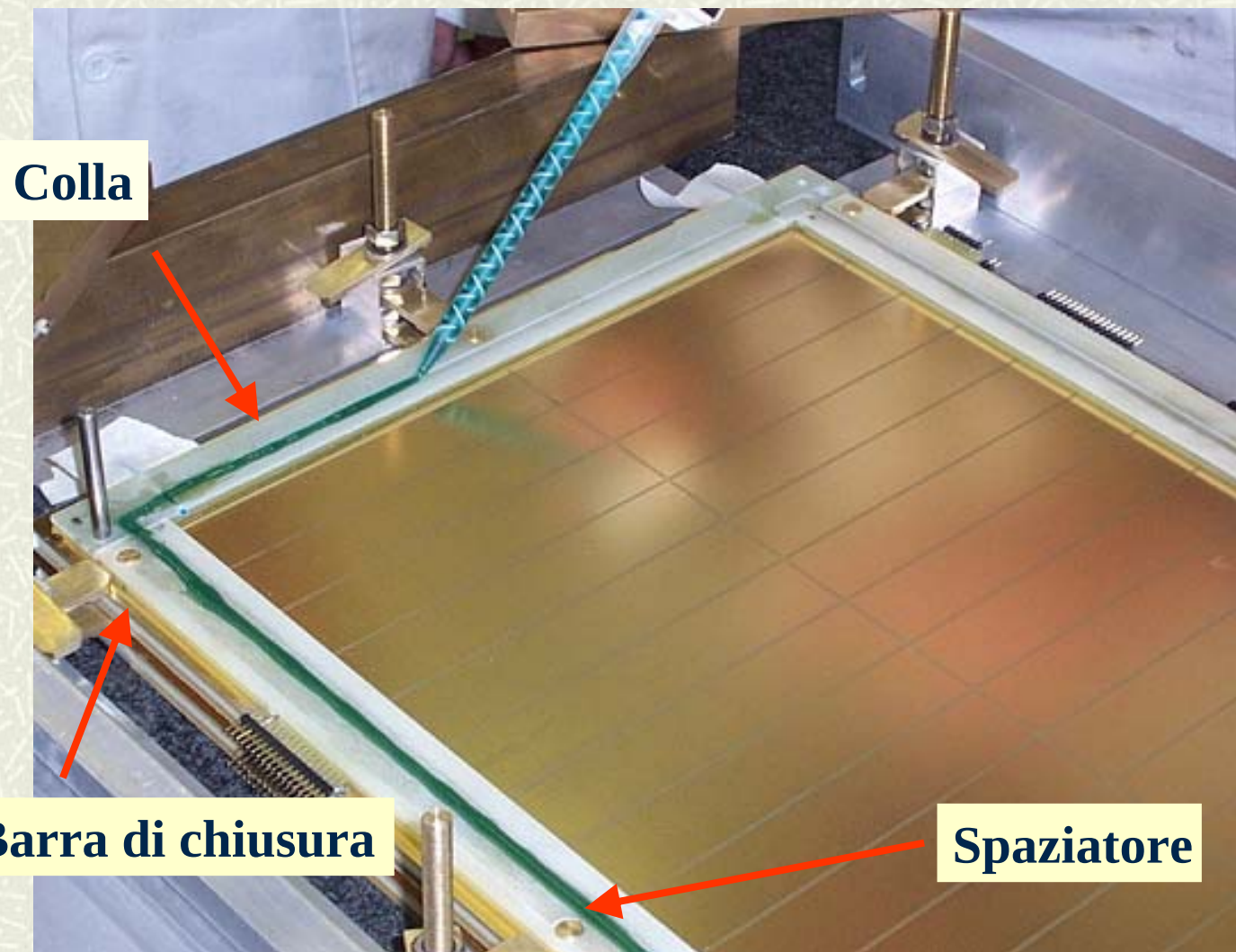
I pannelli catodici vengono stampati, preparati e tessuti con una macchina automatica. La tensione dei fili ed il pitch vengono controllati. Dopo un test ad alta tensione in aria la camera viene assemblata (5 pannelli) e sigillata.

Test sulla tenuta “stagna” della camera, sull'operativita' ad alta tensione, sull'uniformita' di guadagno e sul completo funzionamento (con elettronica di lettura) vengono successivamente eseguiti...

Alessio Sarti & Davide Pinci



Assemblaggio della camera



MWPC instrumentata

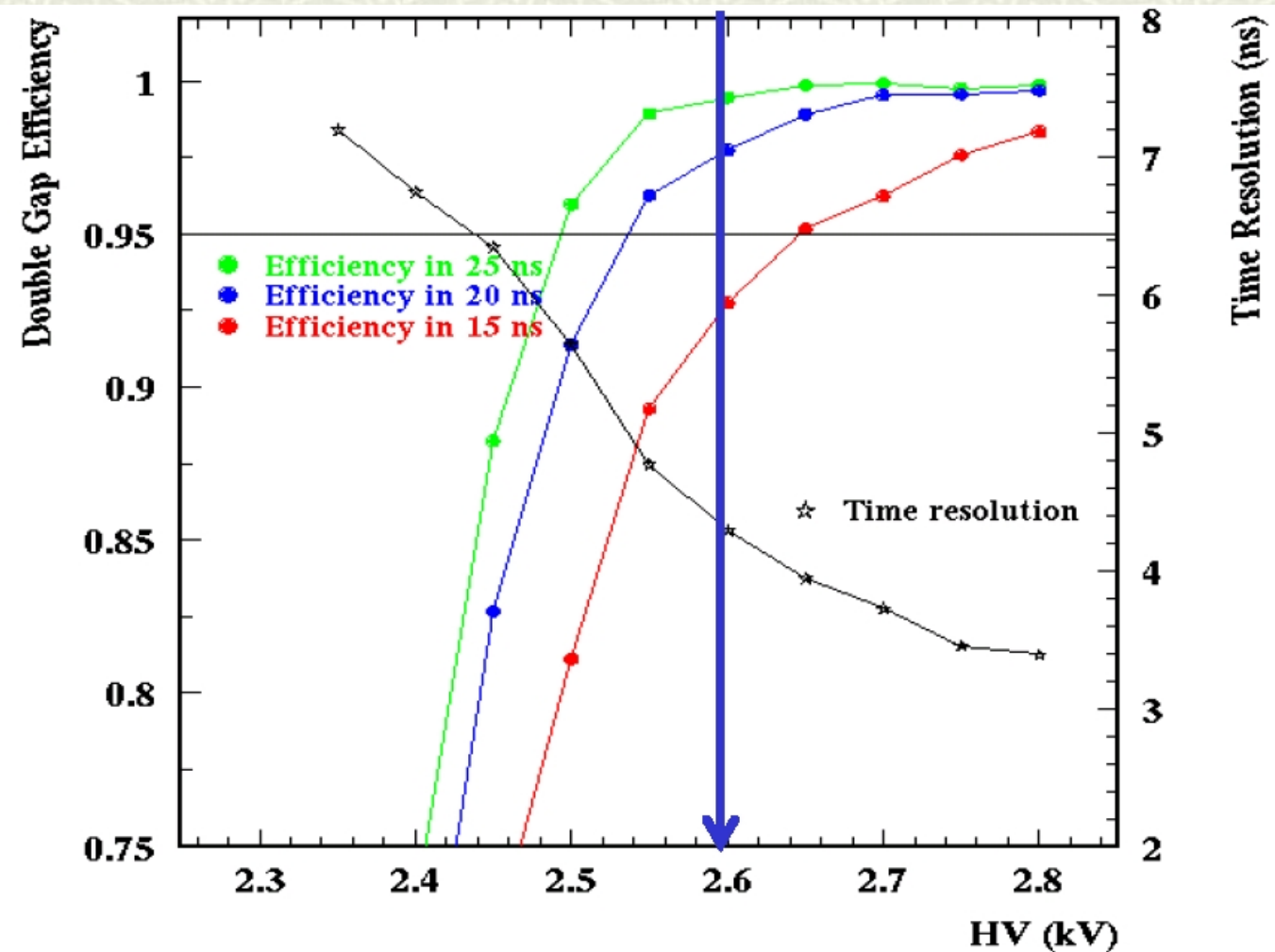


Alessio Sarti & Davide Pinci

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



Estrazione del segnale: cenni sull'elettronica delle MWPC

Le MWPC progettate per LHCb sono utilizzate per misurare il tempo di trigger di un evento con una elevata efficienza:

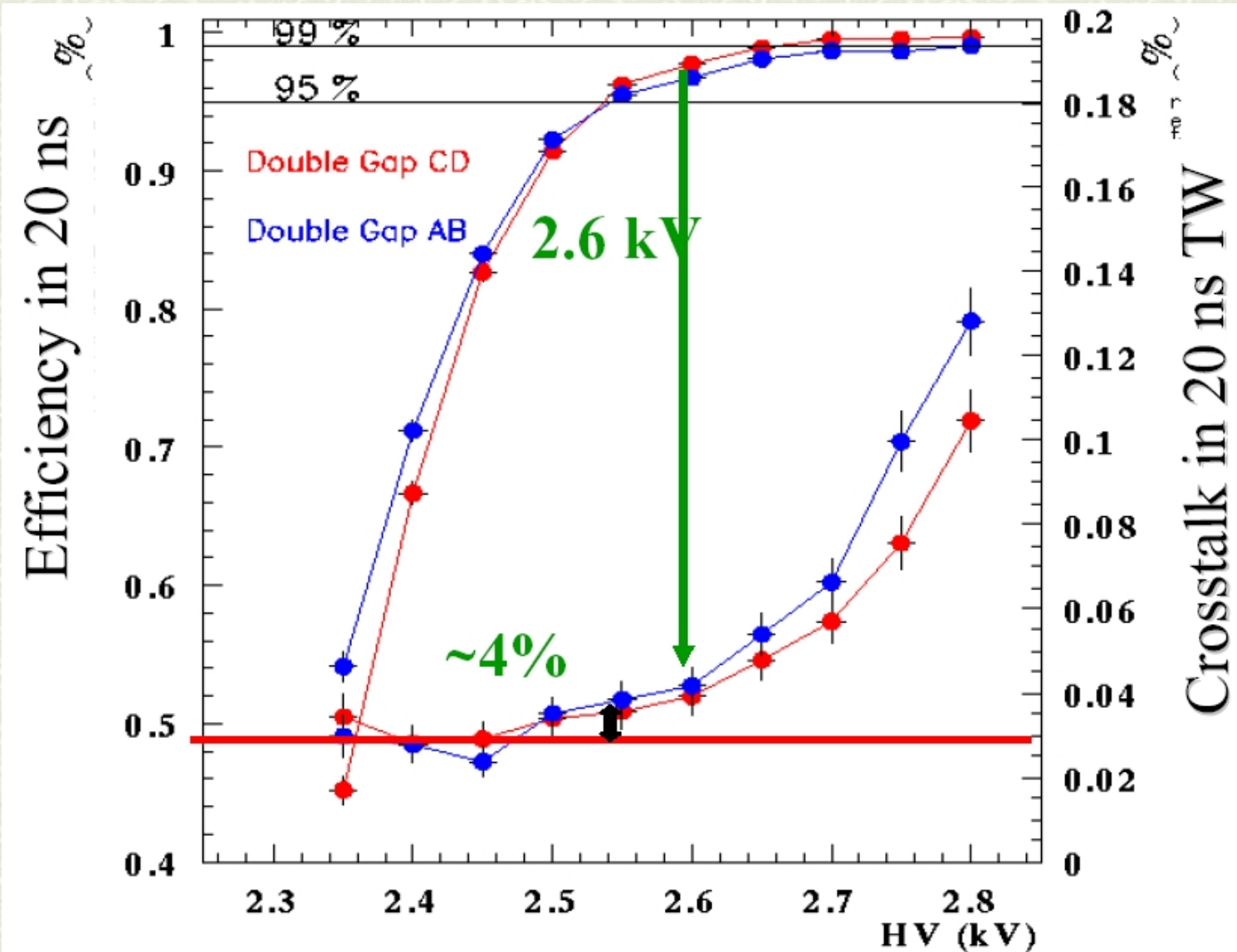
- ✓ Il tempo di picco dell'amplificatore deve essere dell'ordine dei 10 ns
- ✓ La larghezza in tempo dell'impulso elettrico $< 50\text{ns}$
- ✓ E' necessario un basso cross-talk tra i canali.

Si definisce “cross-talk” il segnale letto su di una pad quando la ionizzazione (passaggio della particella carica) avviene in corrispondenza di un'altra pad. Questo fenomeno avviene principalmente perche':

- ✓ Parte della carica di ionizzazione si distribuisce su piu' pad, specie se la particella attraversa la camera nel mezzo fra due pad (cross-talk induttivo)
- ✓ Il segnale elettrico letto su di una pad induce un segnale parassita sulle pad confinanti (cross-talk capacitivo)

Misura del cross talk induttivo in funzione di V

Il crosstalk
induttivo,
irriducibile,
varia tra il
5% ed il
15%
nell'area di
lavoro



Il sistema di test con raggi cosmici



Test con raggi cosmici

- ✓ I raggi cosmici sono particelle comode per testare rivelatori
- ✓ Abbiamo un sistema in grado di testare fino a 6 camere alla volta.



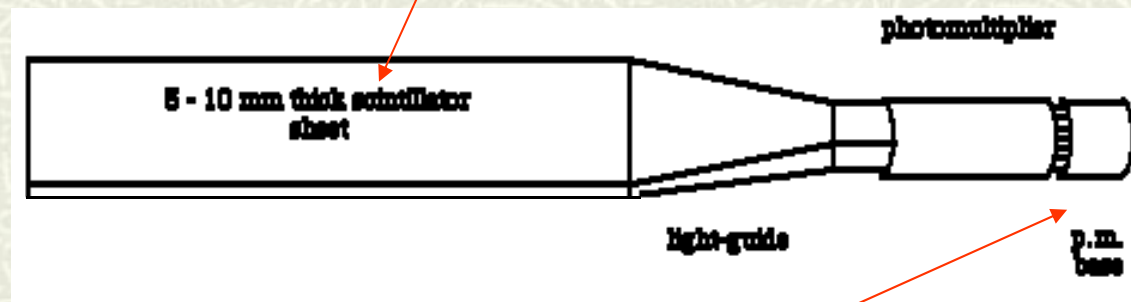
Alessio Sarti & Davide Pinci

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)

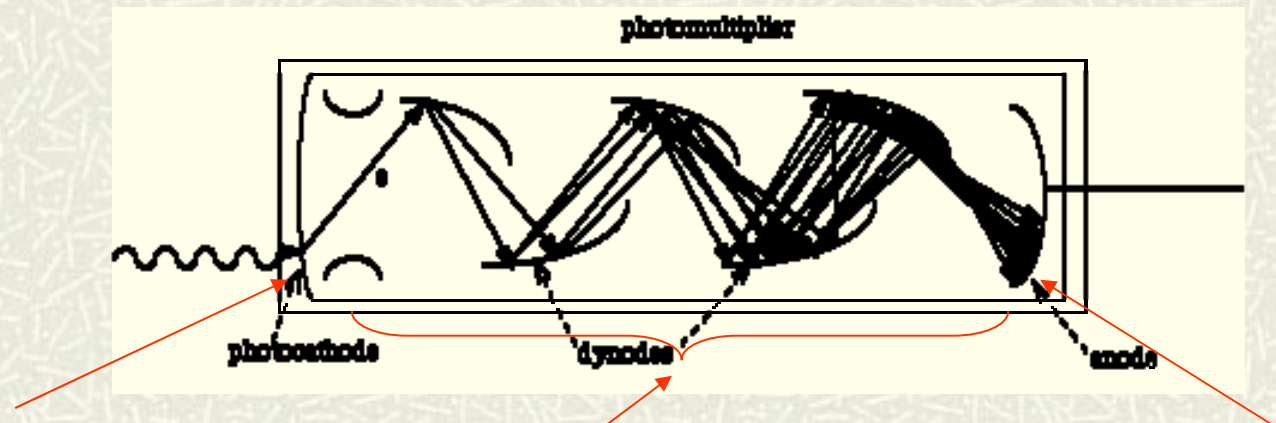
- Il sistema di trigger e' basato su "rivelatori a scintillazione":
 - cristalli particolari come lo Ioduro di Sodio (identico al Cloruro di Sodio con lo Iodio al posto del Cloro) che producono fotoni di bassa energia se sono attraversati da particelle cariche;



- I fotoni viaggiano nel cristallo e vengono rivelati attraverso FotoMoltiplicatori (PM)

Scintillatori e fotomoltiplicatori (ii)

- Il fotomoltiplicatore converte il segnale ottico in segnale elettrico rivelabile



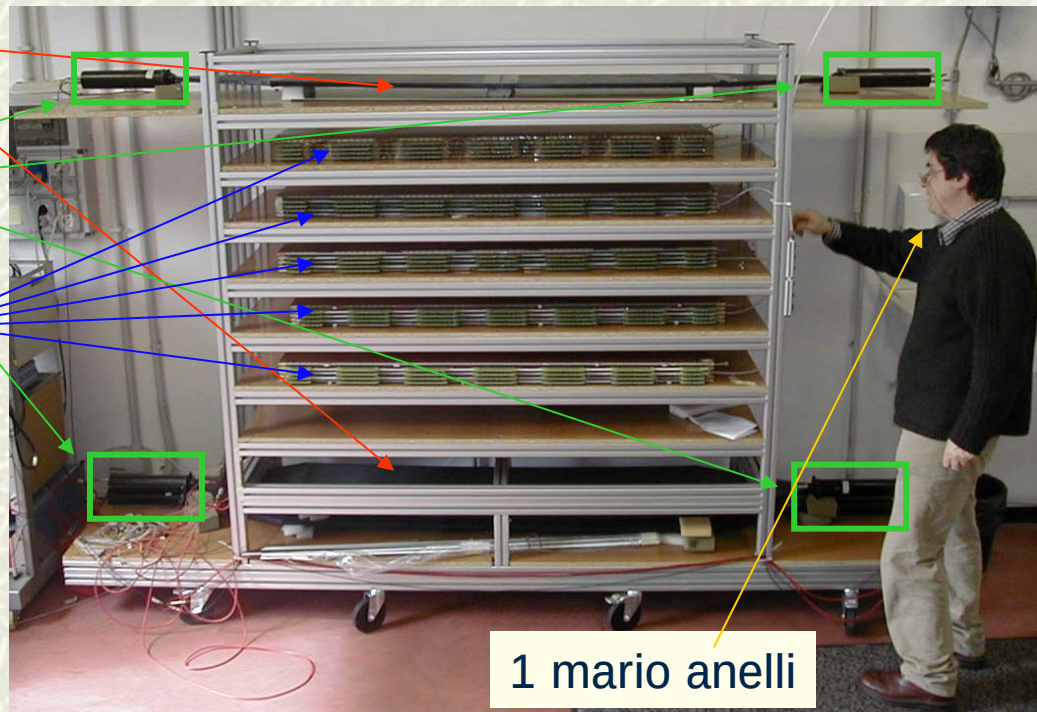
il fotone estrae un elettrone dal "fotocatodo"

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 nostro sistema di trigger

- # Si basa su 3 rivelatori a scintillazione posti 1 sopra e 2 sotto le camere a fili
- # Letti su ambo i lati con 6 PM
- # 5 camere in test



Il “trigger” e’ dato dall’AND logico dei 6 segnali cioe’ scatta soltanto se tutti i 6 PM hanno “visto” il passaggio del muone

Frequenza di “casuali”

- # I fotomoltiplicatori emettono “segnali” di durata 100 ns
 - # Alcuni di questi (la maggior parte) sono dovuti al rumore termico che estrae elettroni dal fotocatodo.
 - # Qual'è la probabilità di avere un “trigger” casuale, non dovuto al vero passaggio di un muone, supponendo che ogni PM emetta 1000 segnali al secondo?
- probabilità di averli contemporanei

$$(1000 \times 100 \times 10^{-9})^6 = 10^{-24}$$

segnali al secondo

durata del segnale

Il risultato è assolutamente trascurabile. Il trigger “scatta” solo su veri muoni con un frequenza di circa 10 Hz.

Il sistema di acquisizione dati (DAQ)

- Il DAQ e' basato su un Time-to-Digital-Converter (TDC) che e' in grado di misurare la differenza tra il tempo di risposta della camera ed il tempo del segnale del trigger con una precisione di 0,8 ns.
- Il sistema di acquisizione viene letto se tutti gli scintillatori hanno visto il muone (segnale di trigger);
- Per il momento possiamo acquisire 192 canali -> 3 camere
- Viene acquisita la differenza tra il tempo di risposta di della camera ed il tempo del segnale di trigger (che funziona da START del cronometro).



Esempio di un evento

✚ Ecco come il sistema vede il passaggio di un muone

