

**Incont
ri ■ di
fisica**

2010

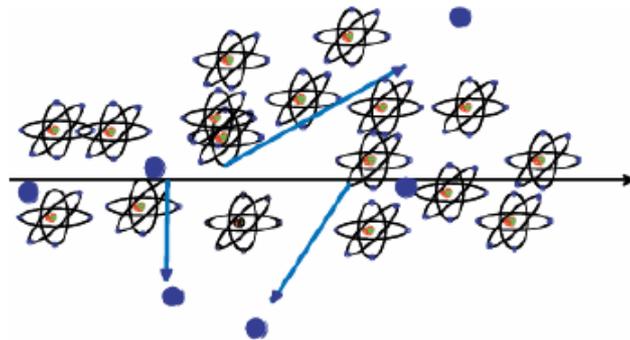
*Misura della velocità di deriva degli elettroni nella miscela
gassosa di un rivelatore di particelle a filo*

P. Campana – M. Anelli – R. Rosellini

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 sarà ceduta agli elettroni.
- Possiamo usare la formula di Bohr per il calcolo classico dell'energia ceduta da una particella che sia molto più pesante di un elettrone.



L'impulso che l'elettrone subisce è:

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

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)

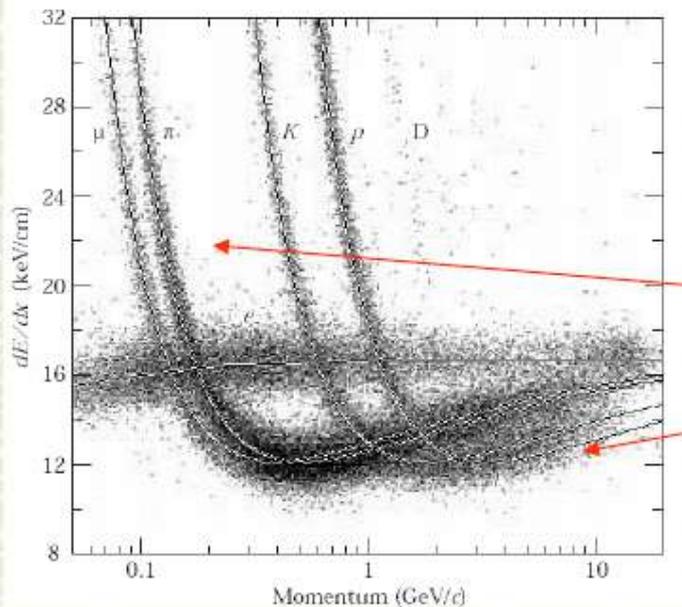
■ Se consideriamo N_e il numero di elettroni per unita' di volume:

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)

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



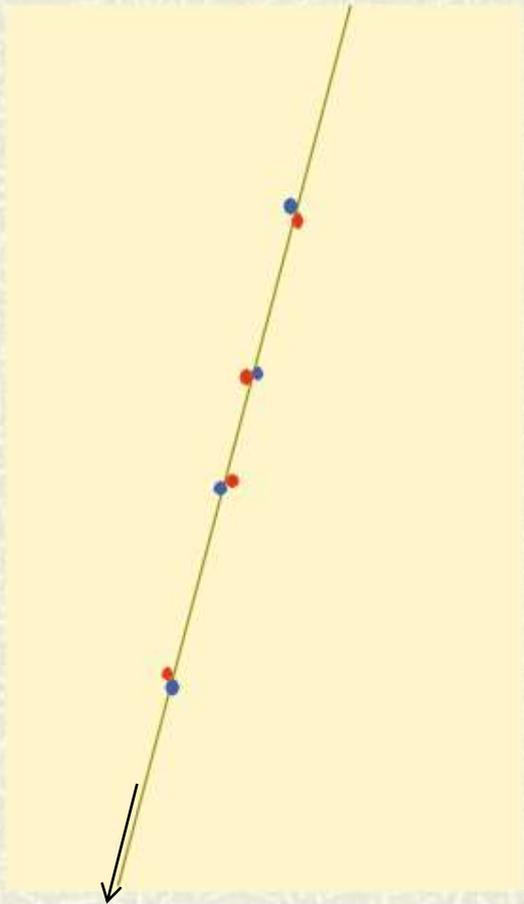
$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{z}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]$$

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

Urti random tra la particella e gli atomi di gas (cammino libero medio, λ)

$$\lambda = 1 / (n \sigma)$$

σ sezione d'urto di collisione, n numero medio di urti / cm

Ionizzazione Totale

A seguito dell'emissione degli elettroni primari nel processo di prima ionizzazione, questi, con la loro energia cinetica provocano una successiva ionizzazione secondaria (totale):

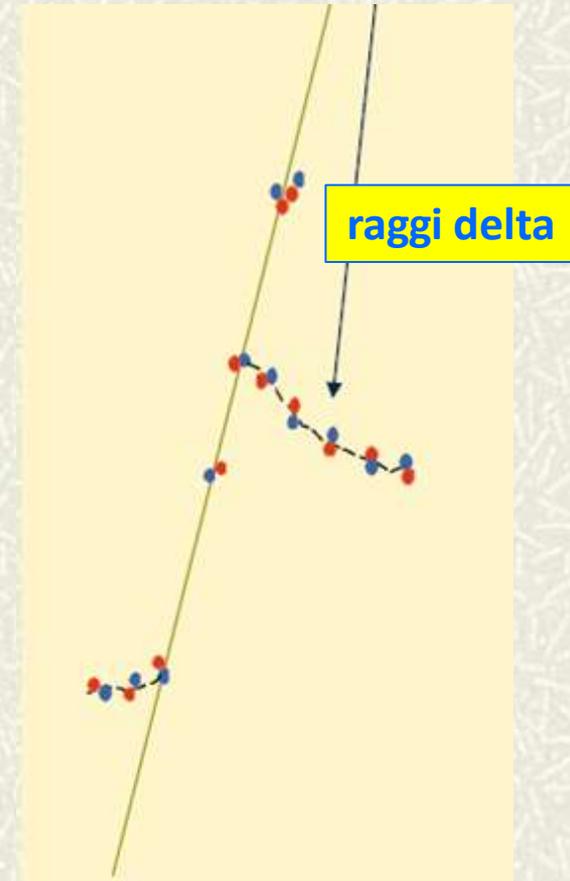
- elettroni emessi a grande energia (raggi delta)
- diseccitazione di atomi metastabili

Solo una frazione dell'energia persa dalla particella e' spesa in ionizzazione. La quantita' minima di energia necessaria per produrre una coppia e' :

$$W = L \, dE/dx \quad (\text{potenziale di ionizzazione})$$

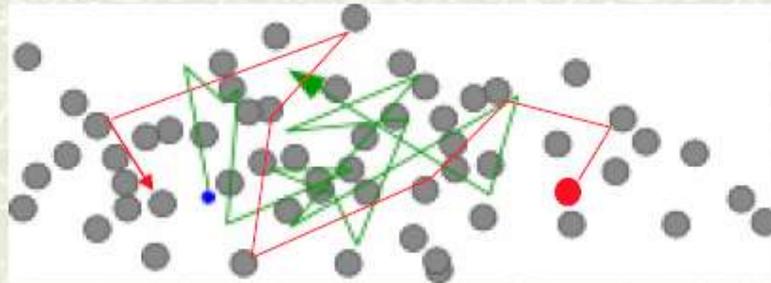
Gas	W(eV)
He	42.3
Ne	36.4
Ar	26.3
Xe	21.9
CO ₂	32.8
CH ₄	27.1

Il valore di **W** dipende dal tipo di gas e dal tipo di particella incidente (ed in prima approssimazione non dalla energia della particella)

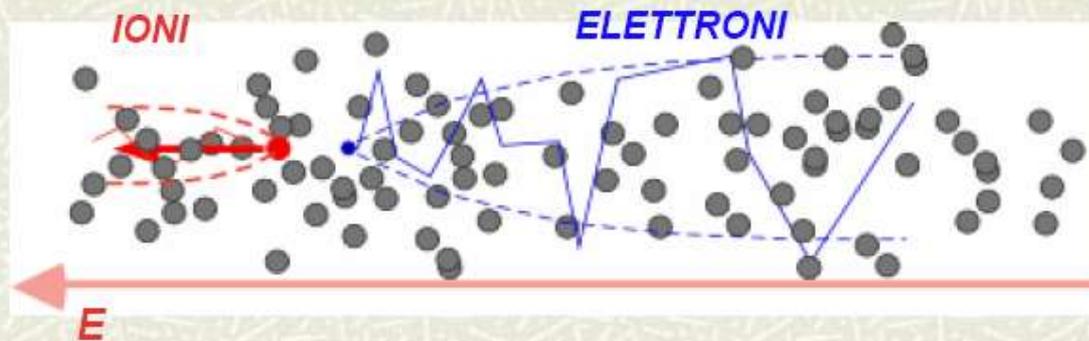


Deriva delle cariche nel gas

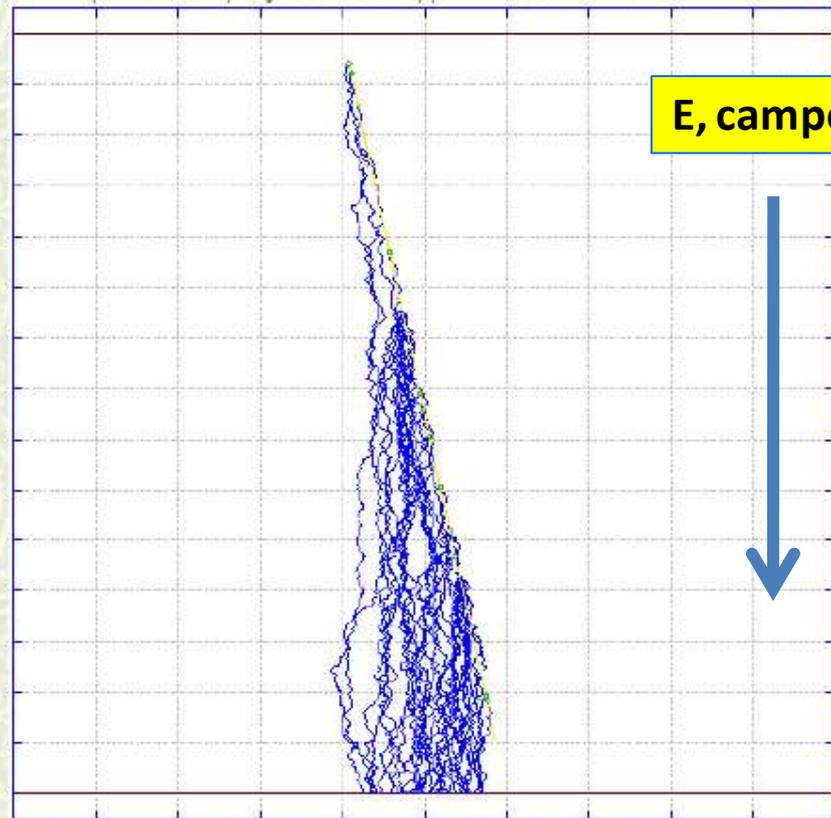
Con un campo elettrico nullo $E = 0$: "diffusione termica"



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



Diffusione e risoluzione spaziale

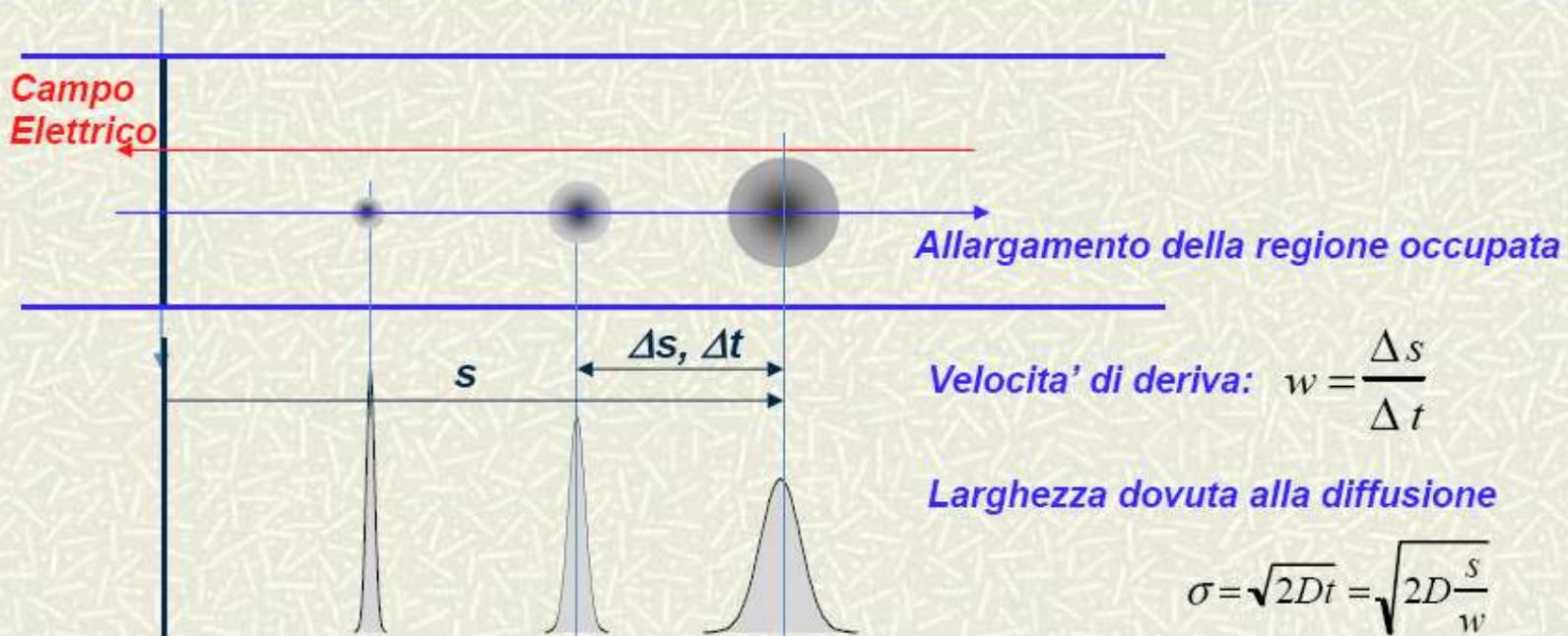


E, campo elettrico

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.

Deriva e diffusione degli elettroni



Velocita' di deriva: $w = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Larghezza dovuta alla diffusione

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D \frac{s}{w}}$$

$$\sigma_x = \sigma_1 \sqrt{x}$$

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

Gli elettroni (e gli ioni) urtano le molecole del gas e la loro direzione cambia continuamente: la velocita' di deriva ("**drift**", u) e' minore della velocita' tra un urto e l'altro (c) e sotto l'azione del campo elettrico E diventa

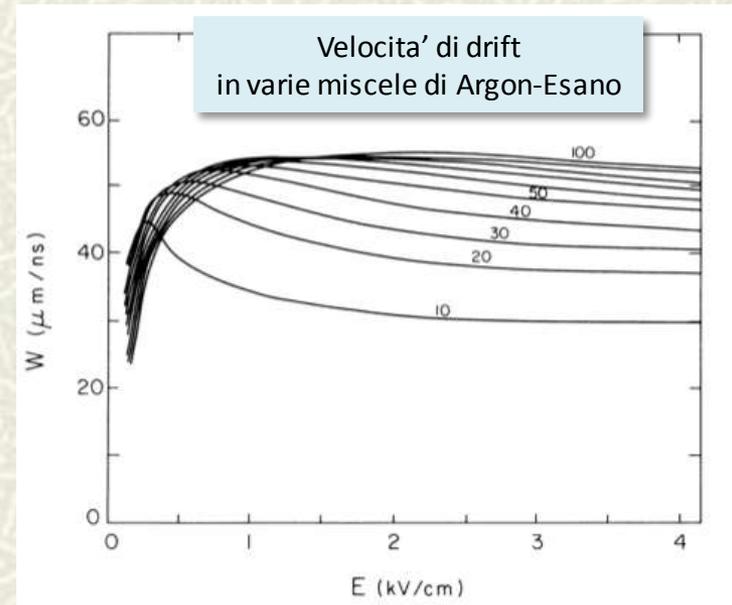
$$u = e E / m \tau$$

con τ la distanza temporale tra un urto e l'altro

La velocita' di drift dipende drasticamente dal tipo di atomi:

- nei gas nobili gli urti di e^- di bassa energia non ionizzano l'atomo e la sezione d'urto di assorbimento rimane alta (**bassa u**)
- nei gas molecolari, gli urti di e^- di bassa energia eccitano gli stati rotazionali, gli e^- perdono energia avvicinandosi al **minimo di Ramsauer** della sezione d'urto (**alta u**)

Per una data miscela e per valori elevati del campo elettrico, la velocita' di drift non cresce ulteriormente ("satura") e raggiunge un valore costante



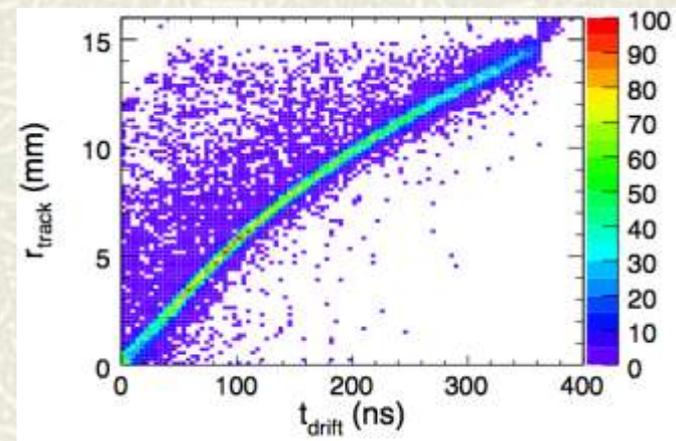
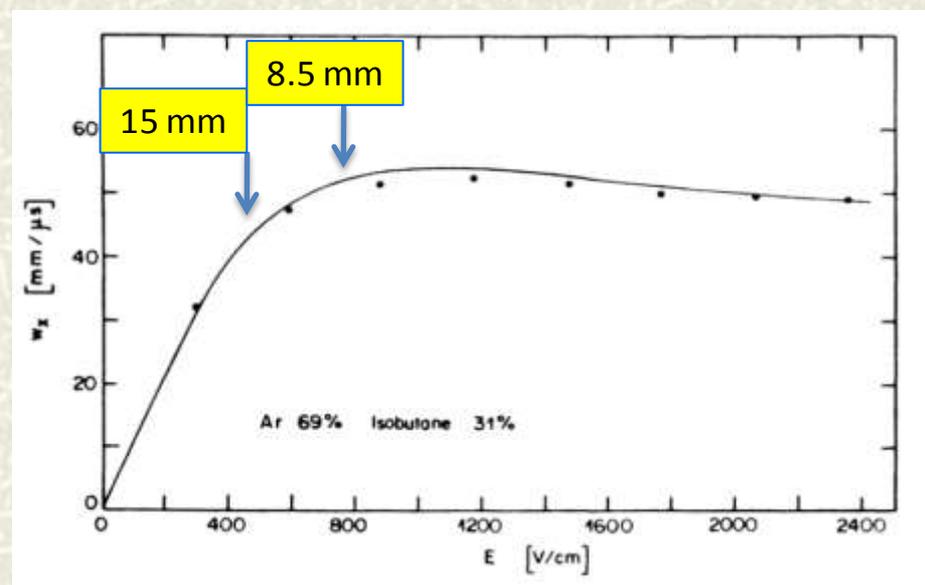
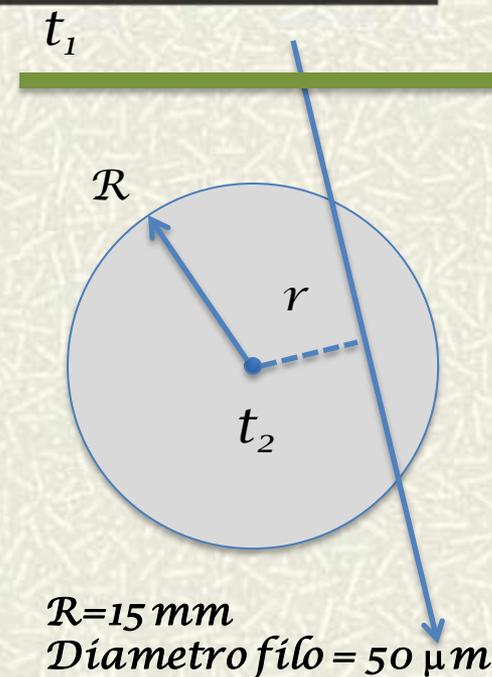
Misura di posizione attraverso il drift

Misurare il tempo di drift degli elettroni nel gas per risalire alla distanza del punto di passaggio della particella rispetto al filo (nell'ipotesi che la particella sia relativistica):

$$t_2 - t_1 = r / u(r)$$

$u(r)$ non e' costante solo nella parte piu' esterna del tubo a drift ma lo e' in tutta la zona centrale ($u = 50 \text{ mm}/\mu\text{s}$)

Si otterra' cosi' una relazione quasi lineare tra $t_2 - t_1$ ed r (relazione $r-t$)



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:

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

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 ...) puo' limitare lo sviluppo di una valanga attraverso la cattura di elettroni liberi:

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

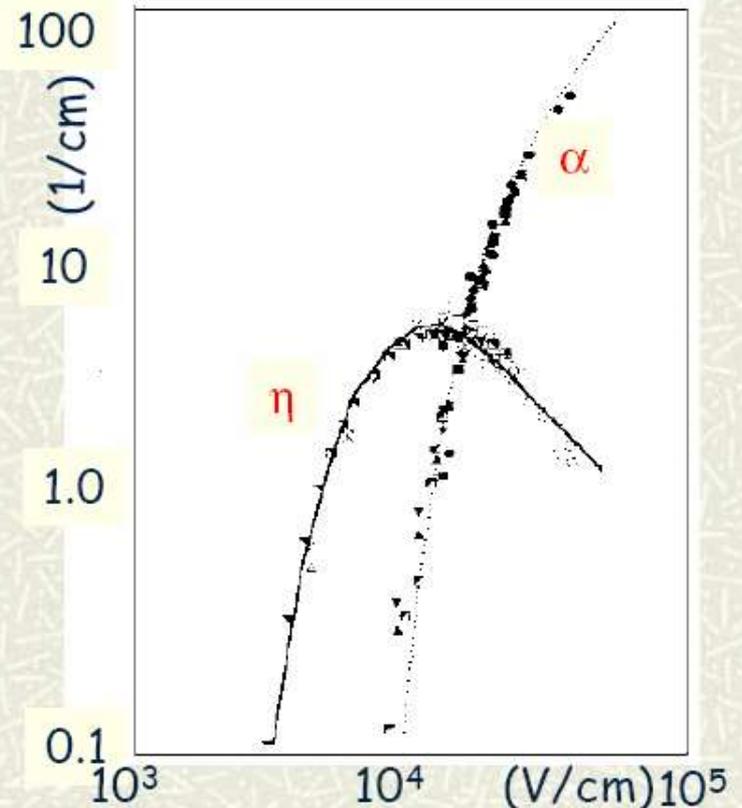
η coefficiente di attachment.

Il guadagno effettivo diventa quindi:

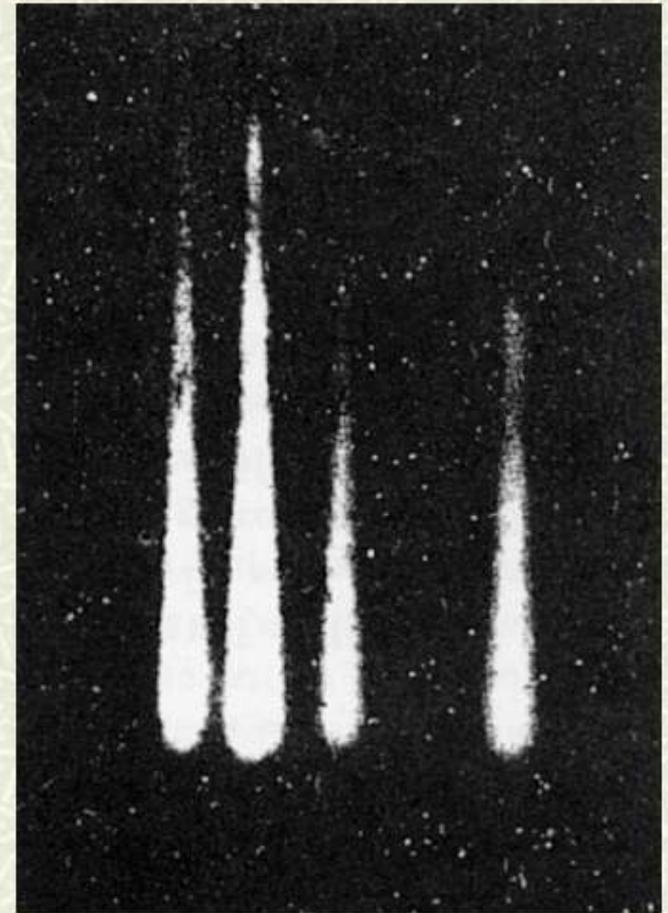
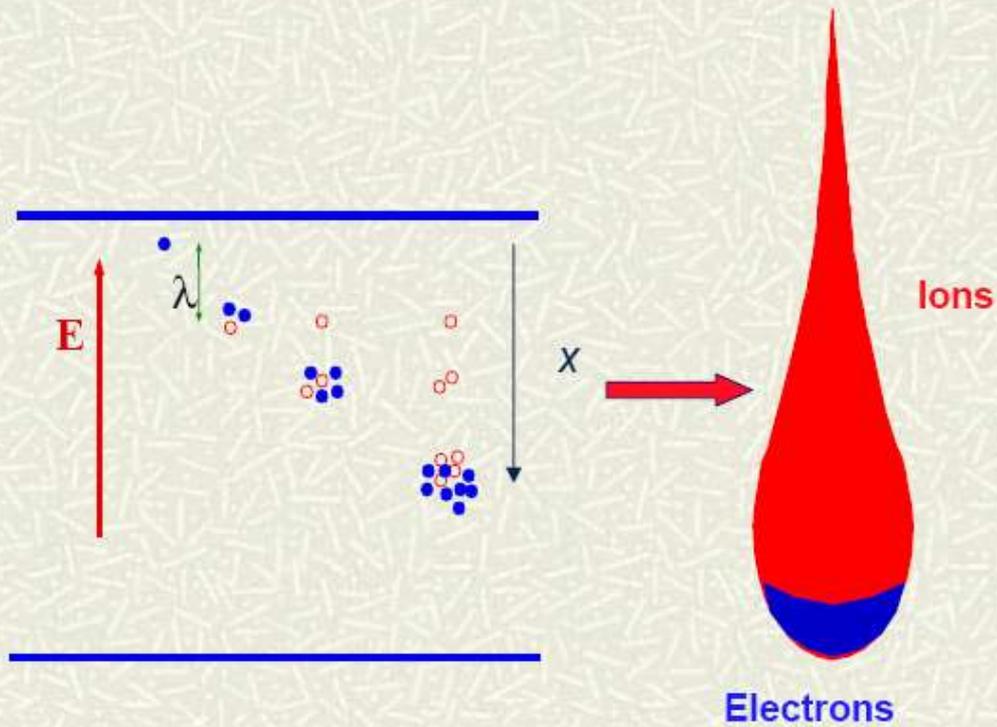
$$M = \exp \left[\int (\alpha(x) - \eta(x)) dx \right]$$

Inoltre se la 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 $10^7 + 10^8$ elettroni.



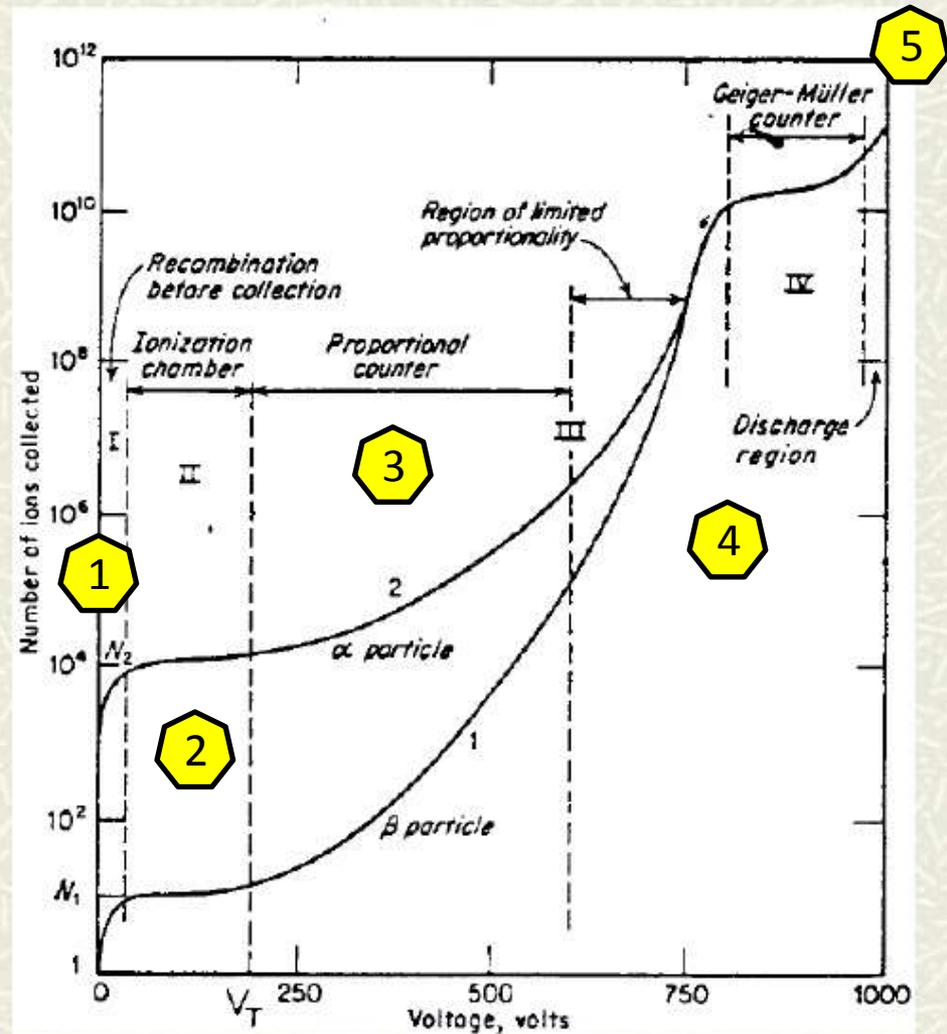
La valanga



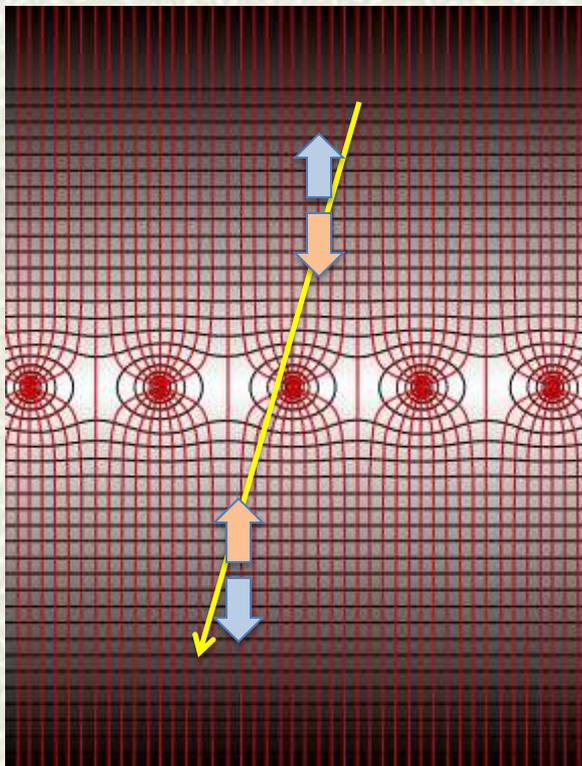
Moltiplicazione e tensione

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 filo (MWPC)



Camera costituita da un piano di fili anodici (a $+V_0$) posti tra due catodi metallici a massa con spaziatura s

Nella zona lontana dal filo, il campo e' costante

$$E = CV_0/\epsilon_0 s$$

e gli elettroni derivano verso gli anodi sotto l'influenza del campo elettrico

In prossimita' del filo, il campo elettrico e' gradatamente piu' intenso e assume la forma del condensatore cilindrico

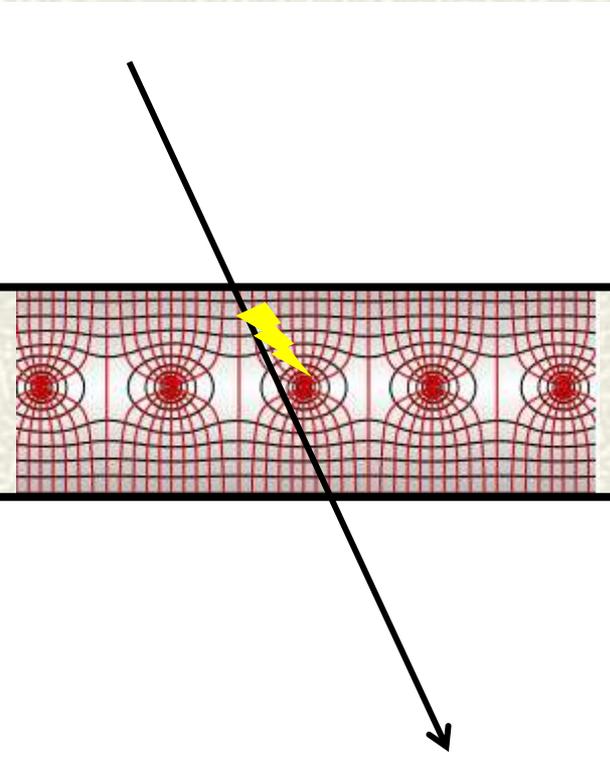
$$E = CV_0/2\epsilon_0 s (1/r)$$

dove r e' la distanza dal centro del filo

A causa della crescita del campo, gli elettroni subiscono una forte accelerazione, aumenta la ionizzazione secondaria e si innesca una valanga che si forma a pochi μm dal filo

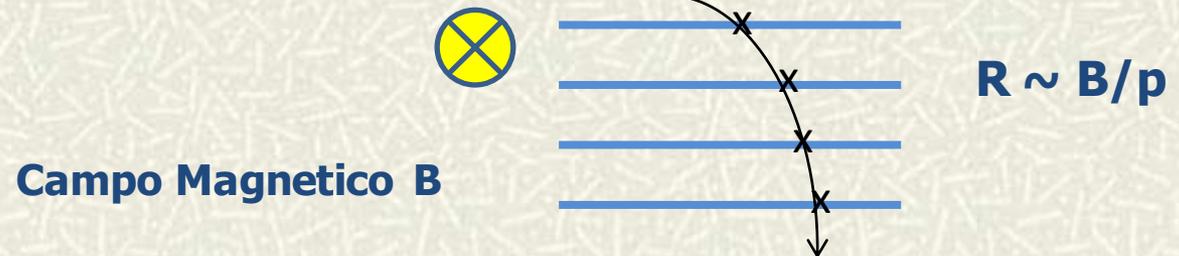
E' l'innesco del processo di moltiplicazione/amplificazione che rende possibile la lettura elettronica del segnale: **gli elettroni (veloci) vanno al filo**, **gli ioni (piu' lenti) migrano al catodo seguendo le linee di forza**

Funzioni di una MWPC



Una MWPC puo' adempiere ad una ampia gamma di funzioni:

- permettere di determinare con buona precisione il punto di passaggio di una particella (bastera' avere un passo dei fili sufficientemente fitto, di qualche mm e avere una lettura per ogni filo). Se una serie di MWPC vengono messe in campo magnetico, dalla misura del raggio di curvatura di puo' determinare l'impulso della particella

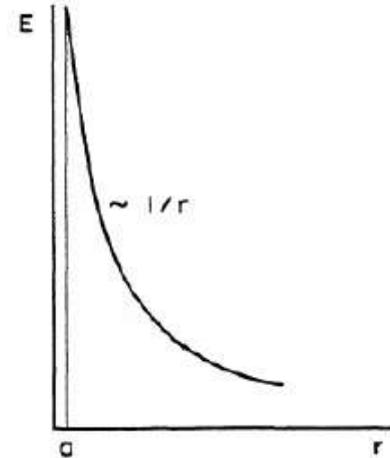
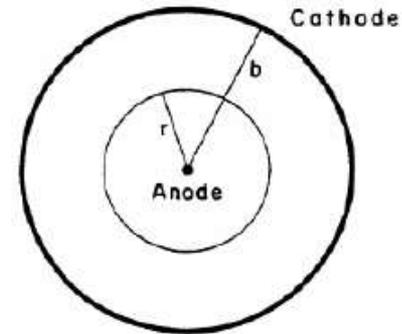


- se la MWPC e' operante in regime di proporzionalita', potremo ricostruire (*dalla curva di Bethe Bloch e conoscendo la natura della particella, ossia la sua massa*) l'energia (**E**) che la particella aveva. Ma servono molte (**N**) misure indipendenti: $dE/E \sim 1/(N)^{1/2}$

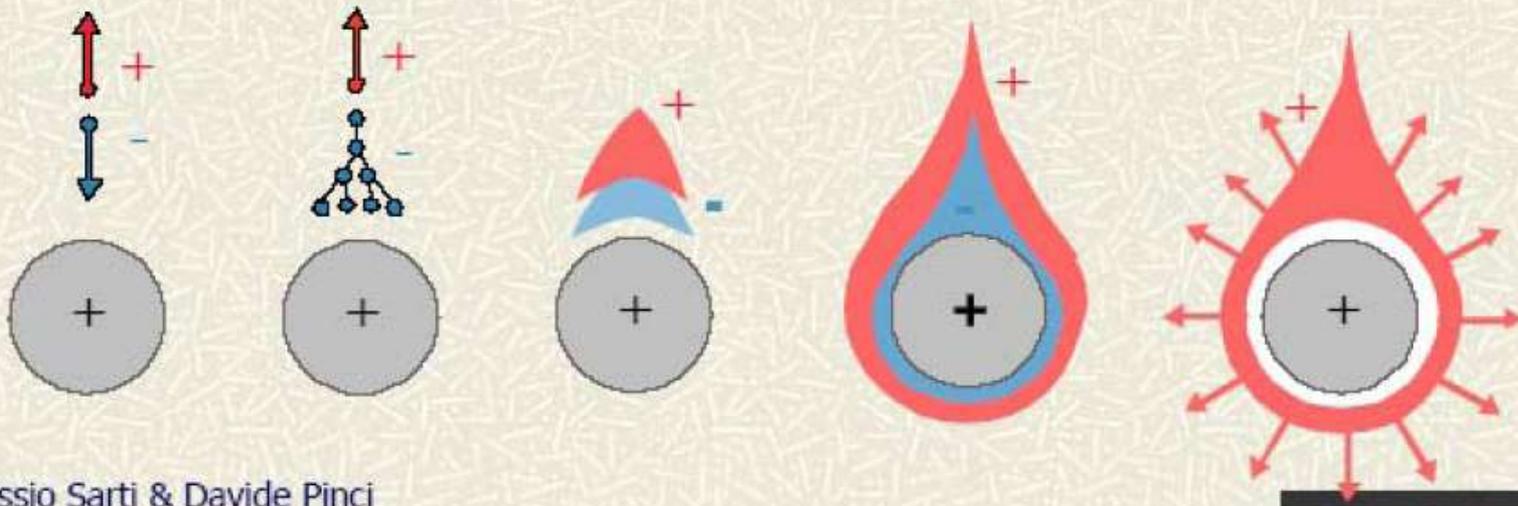
Valanga sul filo

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



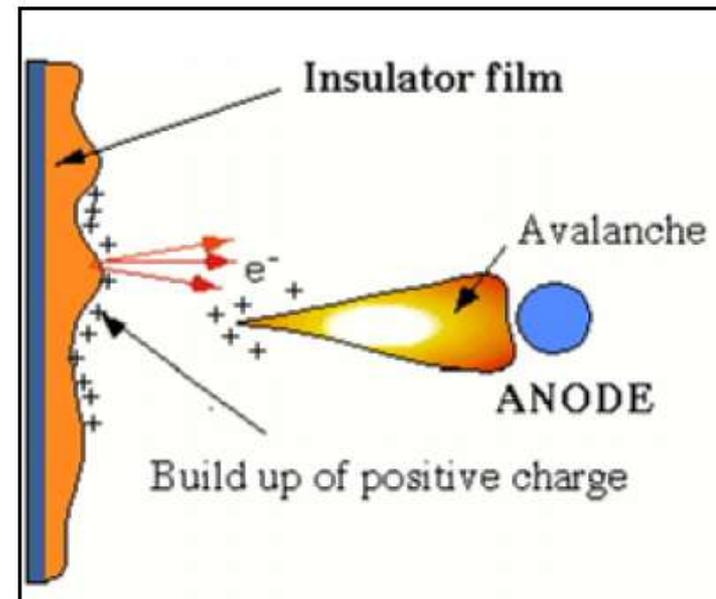
La scelta del gas in una camera proporzionale

I gas nobili (ad es Argon) hanno un basso potenziale di ionizzazione e quindi una buona capacità 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 instabilità nel funzionamento.

Si tende quindi ad associare un gas poliatomico (CO_2 , Metano, Isobutano) che ha la capacità di assorbire tali fotoni

Inoltre vi sono gas che hanno la proprietà di diminuire gli effetti di invecchiamento del rivelatore (effetto Malter) dovuti agli intensi flussi di radiazione (ad es il CF_4)



La formazione del segnale (I)

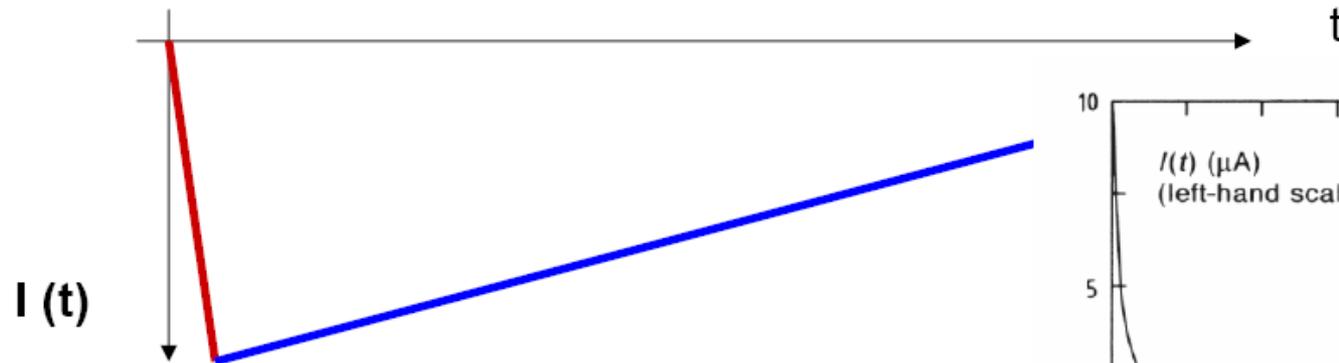
Elettroni e ioni si muovono, nell'intenso campo elettrico vicino al filo, ma in direzioni opposte, e con velocità differenti

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

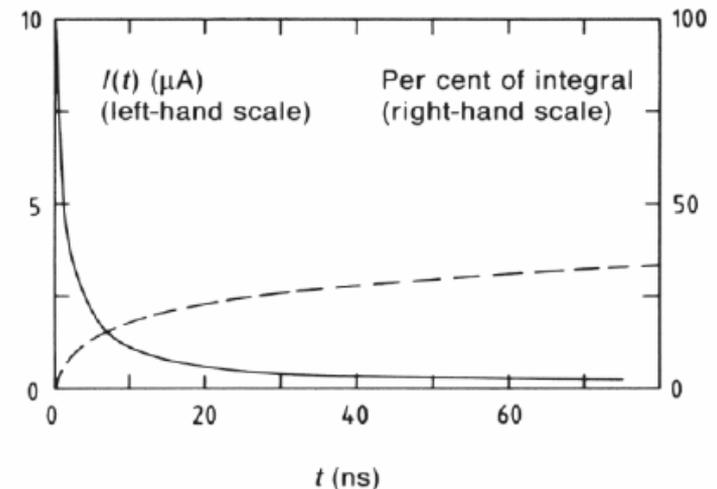
$$Q_{TOT} (1 \text{ cm gas}) = 100 e^- \times 10^5 = 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ C} = 1.5 \text{ pC}$$

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 $I(t)$)



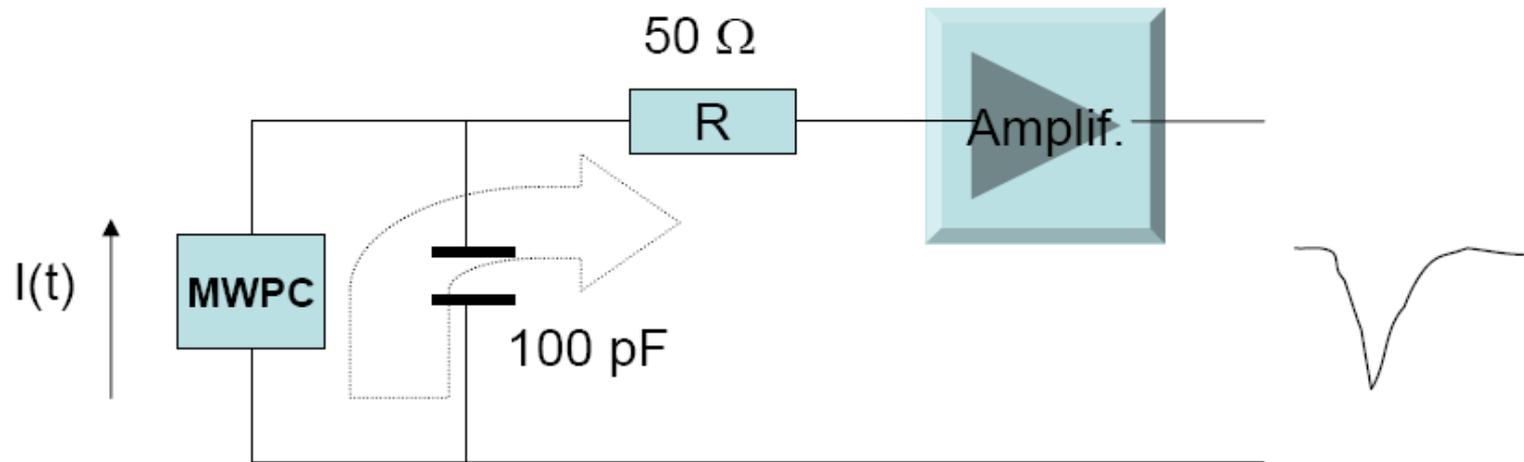
Gli **ioni** si spostano su lunghezze più grandi (qualche mm verso il catodo – 99% del segnale)



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 $\times 100$)

Il sistema di test con raggi cosmici

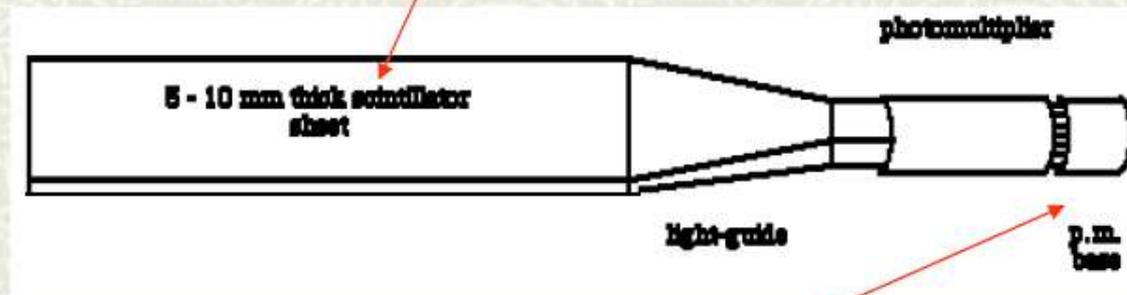


Il sistema di trigger

- 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)

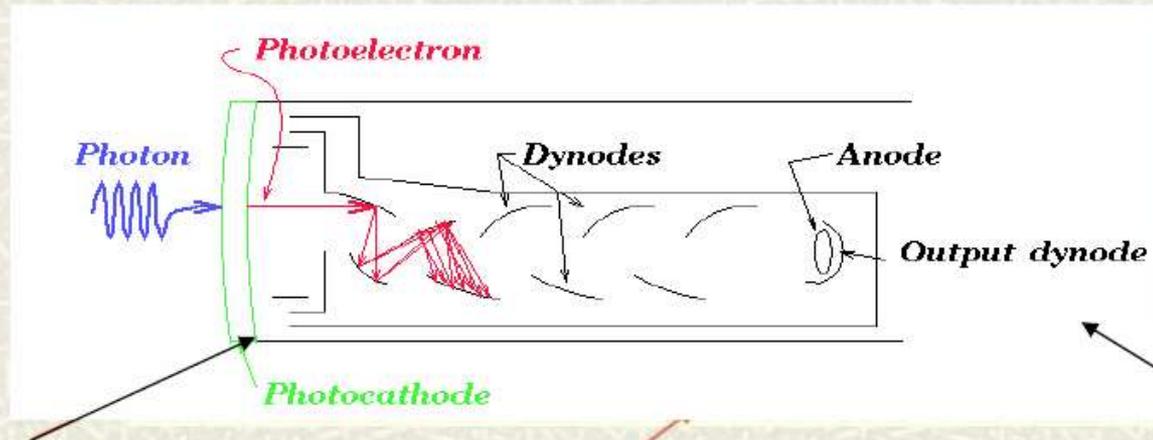
- Il sistema di trigger e' basato su "rivelatori a scintillazione":
 - Una lastra di materiale organico scintillante (plastico, trasparente) che produce fotoni di bassa energia se e' attraversato da particelle cariche;



- 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

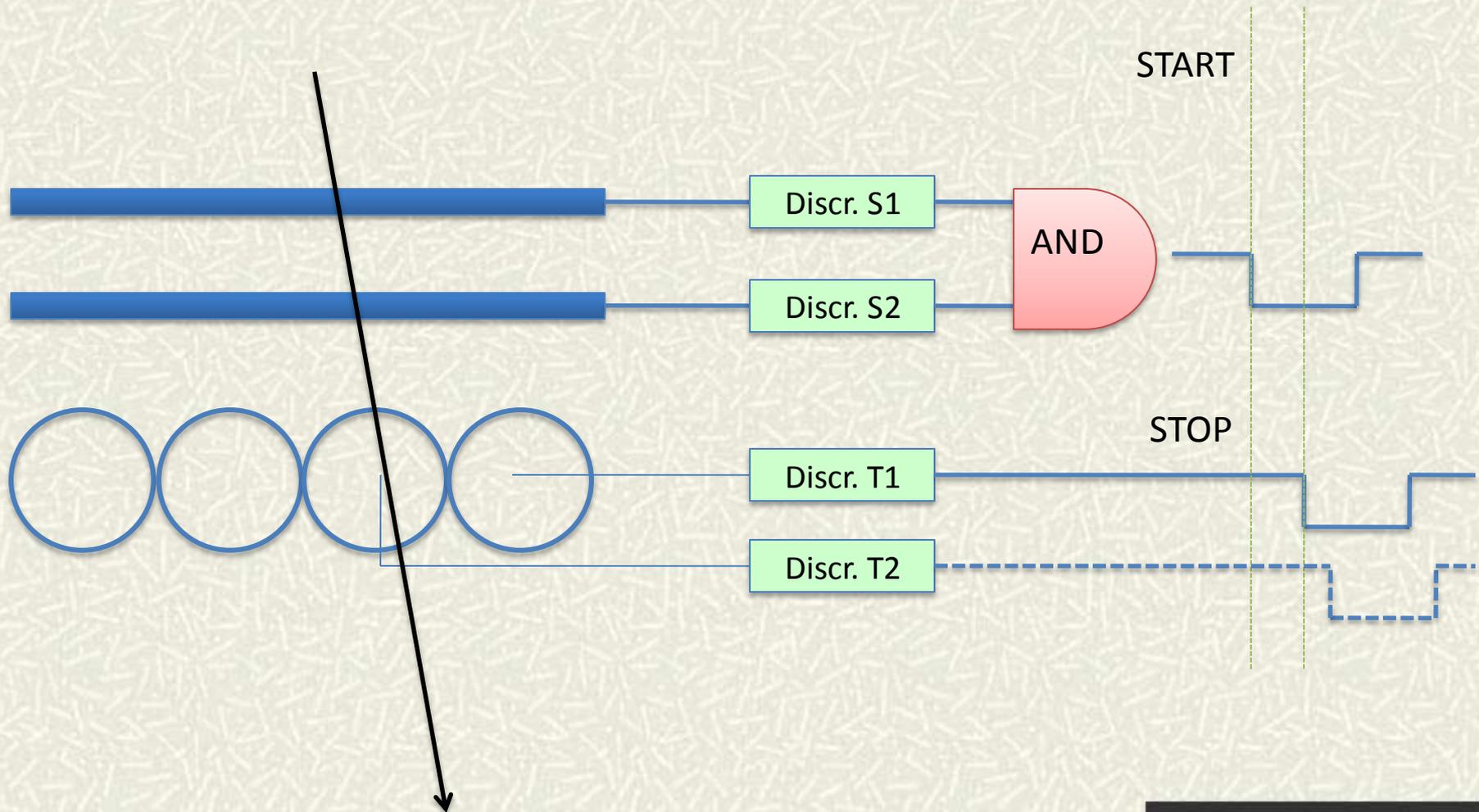


il fotone estrae un elettrone dal "fotocatodo"

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

La misura del tempo di deriva



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)

