

Particle Detectors

Lecture 16

11/05/18

a.a. 2017-2018

Emanuele Fiandrini

Camere proporzionali (MWPC)

Una delle richieste fondamentali per i rivelatori è determinare le **traiettorie** delle particelle prodotte nell'interazione.

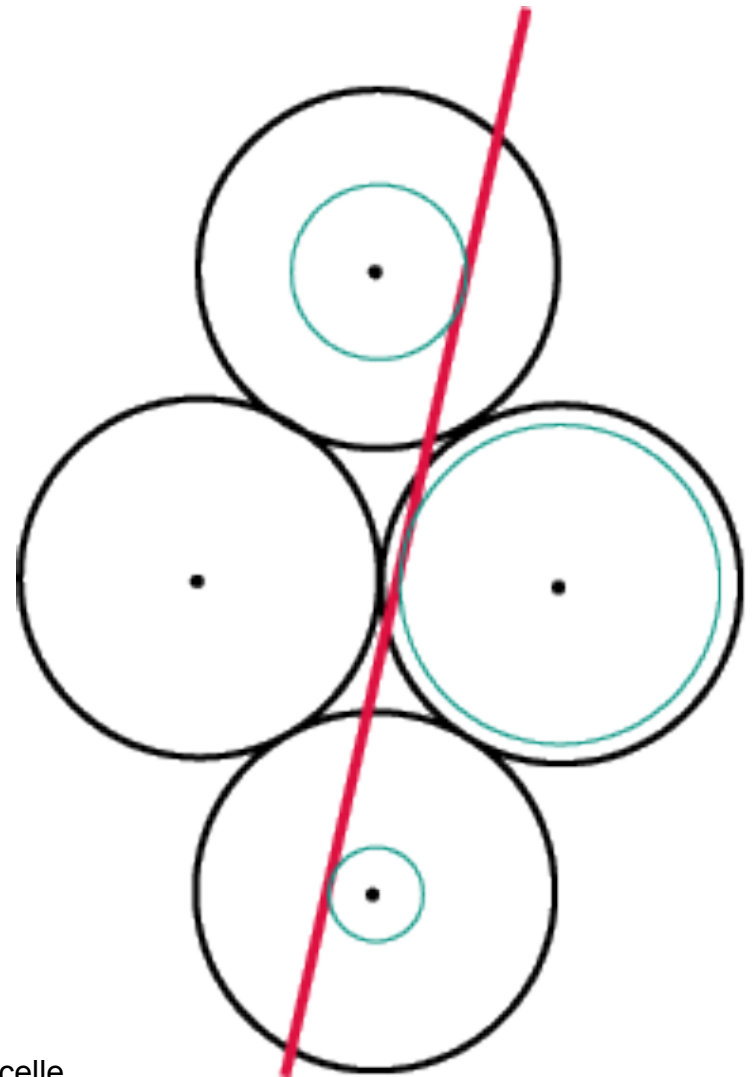
Il tubo proporzionale (o anche il tubo di larocci) può fornire una qualche informazione sulla posizione della particella, ma certamente limitata.

➔ fino al 1970 si usavano camere a scintilla, emulsioni nucleari, camere a bolle ...

Nel 1968 Charpak (**Nobel nel 1992**) dimostrò che le camere proporzionali funzionano come tanti tubi proporzionali messi vicini l'uno all'altro.

PrecisionTracking

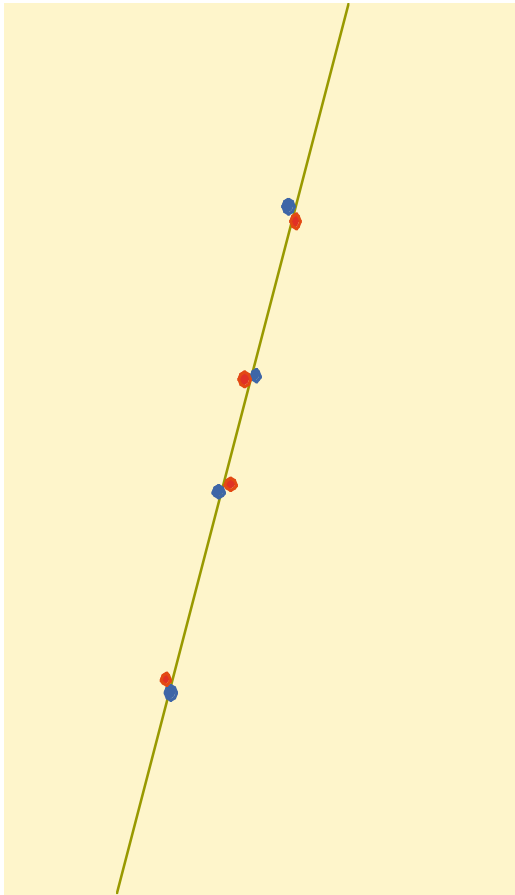
- In una camera proporzionale la risoluzione spaziale e' limitata dalla dimensione della camera, $\sigma = d/\text{sqrt}(12)$
- Camere troppo piccole sono poco efficienti (poche coppie primarie)
- Si possono assemblare "stack" di camere, ma non risolve il problema dell'efficienza e introduce troppo materiale passivo (scattering multiplo)



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: $\varepsilon = 1 - e^{-n}$

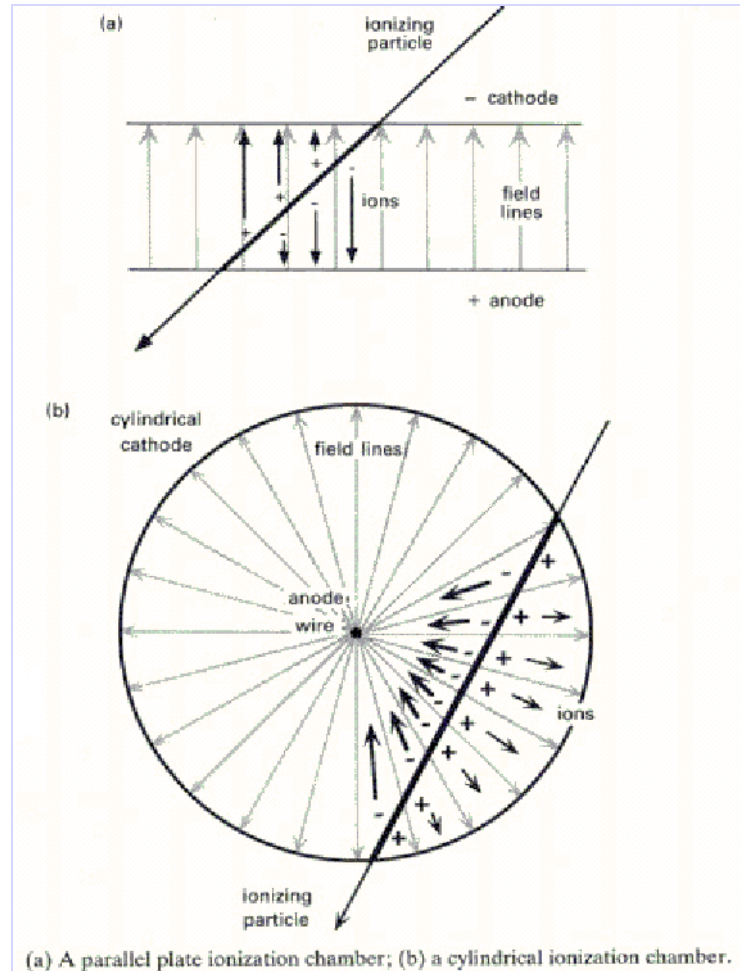
GAS (STP)	Spessore	ε (%)
Elio	1 mm	45
	2 mm	70
Argon	1 mm	91.8
	2 mm	99.3

Rivelatori di particelle

Detector Examples

- Many geometries of wires and planes have been used, e.g.
 - ALICE parallel plate chambers
 - ATLAS cylindrical

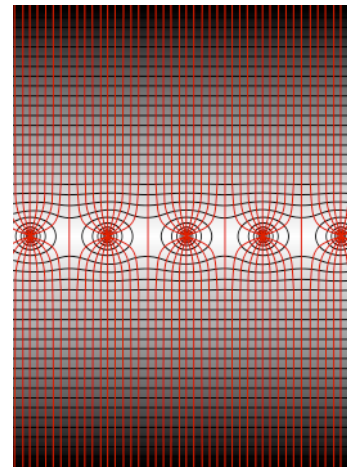
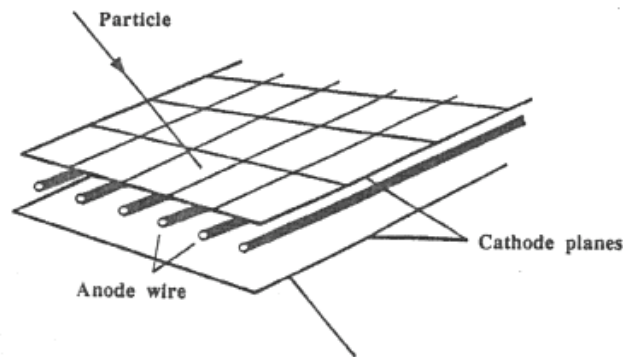
Choice of design is governed by factors such as available space, material in the active region, mechanical support, rate, cost etc.



- In general the length of anode wires is limited by their mechanical stability so that intermediate supports must be introduced.

Multiwire Proportional Chambers (MWPC)

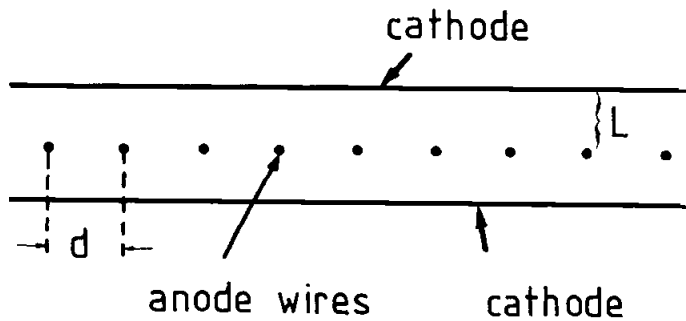
- An array of many closely spaced anode wires in the same chamber can act as independent proportional counters



- Plane of equally spaced anode wires between two cathode planes
 - Typical wire spacing 2mm, typical cathode gap width 7-8mm
 - invented by Charpak in 1968 –Nobel prize in 1992

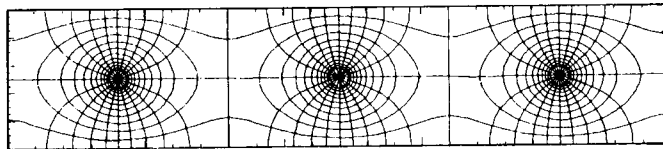
Camere proporzionali (MWPC)

La configurazione base di una camera proporzionale è:



Parametri tipici:

$L=5\text{mm}$, $d=1\div 2\text{ mm}$, $a(\text{filo})\sim 20\mu\text{m}$

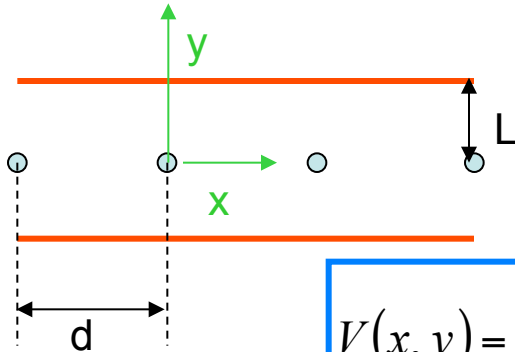


field lines and equipotentials around anode wires

Il catodo è normalmente a massa ed i fili anodici sono a tensione positiva

Camere proporzionali (MWPC)

Il campo elettrico ed il potenziale sono abbastanza complicati, ma ricavabili dall'elettrostatica.



Una forma approssimata con $V(a)=V_0$ e $V(L)=0$ essendo a il raggio dell'anodo è data da:

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon} \left\{ \frac{2\pi L}{d} - \ln \left[4 \left(\sin^2 \frac{\pi x}{d} + \sinh^2 \frac{\pi y}{d} \right) \right] \right\}$$

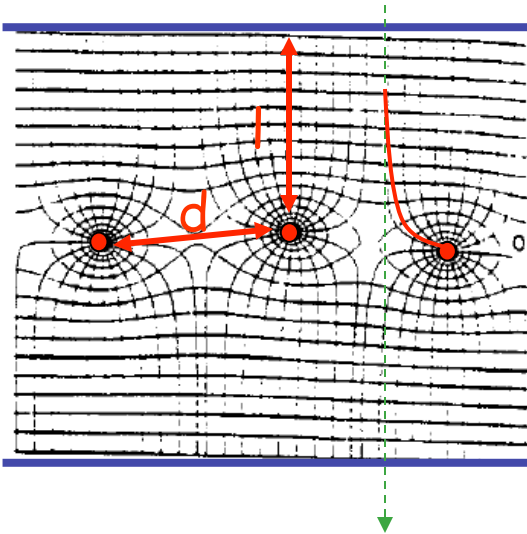
$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon d} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi x}{d} \operatorname{tgh}^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{1/2} \cdot \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\pi x}{d} + \operatorname{tgh}^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{-1/2}$$

essendo C la capacità per unità di lunghezza anodo-catodo $C = \frac{2\pi\epsilon}{\pi L/d - \ln(\pi a/d)}$

Poiché $a \ll d$ la capacità è sempre minore della capacità del condensatore piano con la stessa superficie. Se $d=2\text{mm}$, $L=8\text{mm}$ $2a=30\mu\text{m} \rightarrow C=3.56 \text{ pF/m}$.

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 è praticamente uniforme:

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

e fa derivare gli elettroni.

In prossimità dei fili il campo è 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:

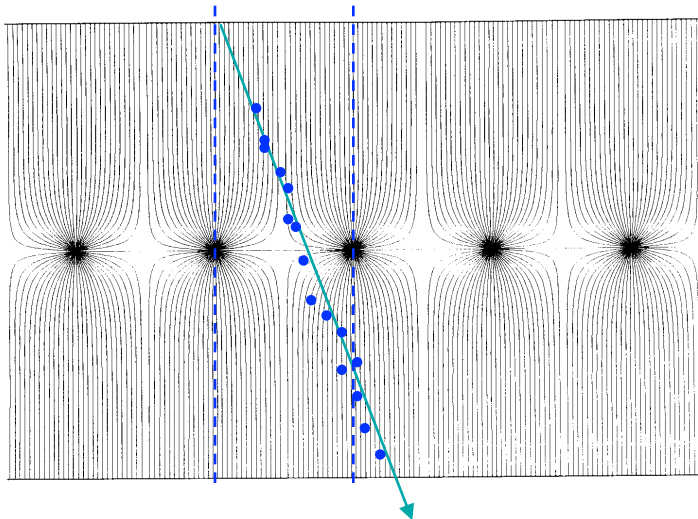
- ✓ Gli elettroni sono raccolti sul filo;
- ✓ Gli ioni iniziano a migrare verso i catodi.

Camere proporzionali (MWPC)

$$V(x, y) = \frac{CV_0}{4\pi\epsilon} \left\{ \frac{2\pi L}{d} - \ln \left[4 \left(\sin^2 \frac{\pi x}{d} + \sinh^2 \frac{\pi y}{d} \right) \right] \right\}$$

$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon d} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi x}{d} \operatorname{tgh}^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{1/2} \cdot \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\pi x}{d} + \operatorname{tgh}^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{-1/2}$$

Lungo le linee di simmetria $x=0$ e $y=0$ il campo può essere scritto come:



$$E_y = E(0, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon d} \coth \frac{\pi y}{d}$$

$$E_x = E(x, 0) = \frac{CV_0}{2\epsilon d} \cot \frac{\pi x}{d}$$

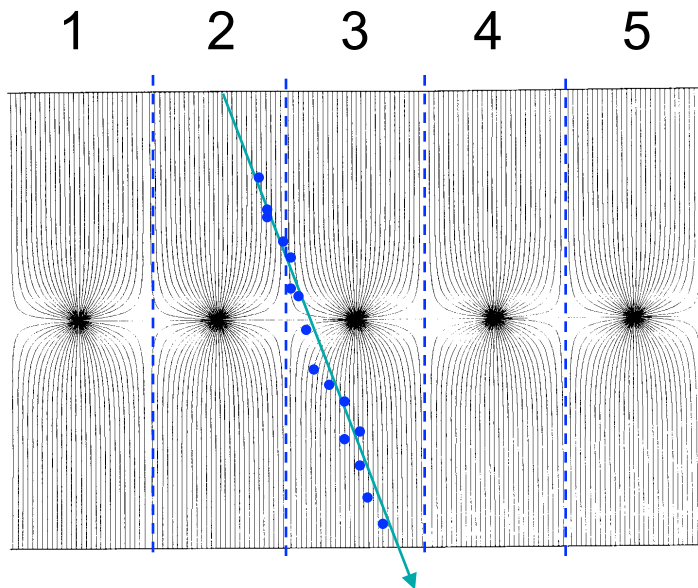
per $y \ll d$ $E(x, y) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r}$ $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$

per $y \geq d$ $E_y = \frac{CV_0}{2\epsilon} \frac{1}{d}$ $\coth \frac{\pi y}{d} \approx 1$

Camere proporzionali (MWPC)

Le linee di campo di ciascun filo si chiudono sul catodo.

Il campo E di ciascun filo è distinto e separato da quello degli altri fili



Ogni filo crea una "camera" separata.
Le coppie generate in una camera k driftano verso il filo k .

Ciascuna camera raccoglie la frazione di carica generata in essa.

Camere proporzionali (MWPC)

Risoluzione in posizione.

Le camere proporzionali sono generalmente usate per misure di posizione. Essendo proporzionali in linea di principio è possibile anche una misura di dE/dx , ma.... code alla Landau.

La risoluzione in posizione è data da:

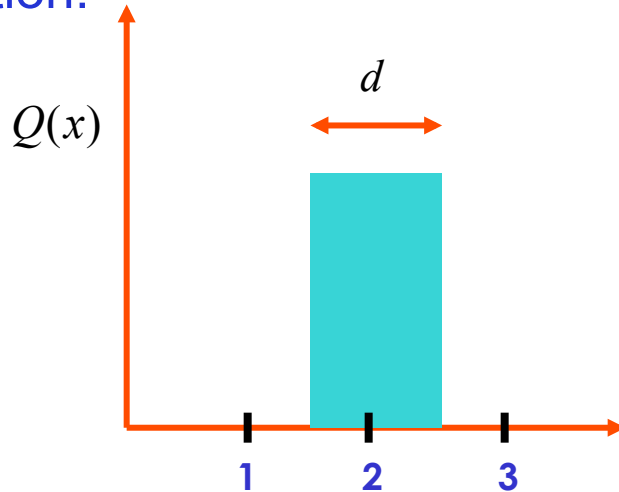
$$\sigma = d/(12)^{1/2}$$

essendo d la distanza fra gli anodi.

Per d di 1÷2 mm la risoluzione è 300÷600 μm quindi piuttosto limitata.

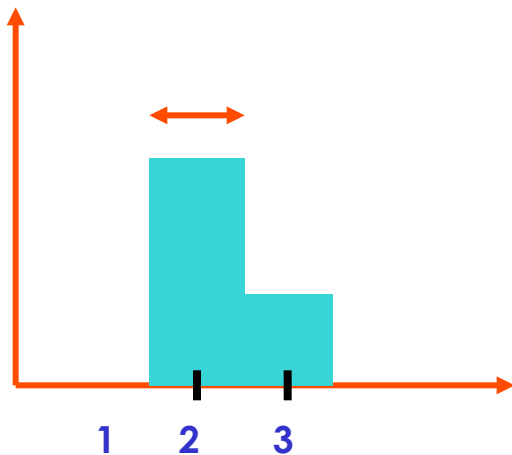
Spatial Resolution: charge sharing

Charge on a single wire/strip is the worst possible situation for the resolution:



$$\sigma^2(x) = \int Q(x) (x - \bar{x})^2 dx = d^2 / 12$$

where $Q(x)$ is charge readout in position x
(in this case a box with width equal to the pitch)



With analogue readout and charge sharing we improve the information content significantly – on the left we know that the hit was between the second and third readout electrode and closest to the 2nd, so we can make a probability function which is much more narrow (some times pitch/10).

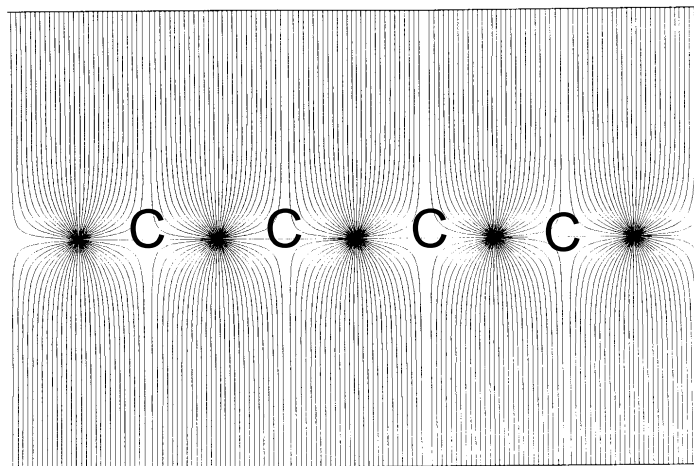
Another way of saying it: For every point between wire/strip 2 and 3 there is a unique value of : $(Q_2 - Q_3) / (Q_2 + Q_3)$, so by measuring this quantity we can reconstruct the position.

Camere proporzionali (MWPC)

Teorema di Ramo e segnale sugli anodi vicini.

Una camera proporzionale è costituita da tanti anodi vicini e non schermati → sono accoppiati capacitivamente.

Ci si attende quindi che il segnale (**negativo**) dovuto al moto degli ioni sia diffuso su tutti gli anodi vicini a quello interessato → sembra impossibile una misura di posizione. Ma **Teorema di Ramo**



Camere proporzionali (MWPC)

Teorema di Ramo e segnale sugli anodi vicini.

Una camera proporzionale è costituita da tanti anodi vicini e non schermati → sono accoppiati capacitivamente.

Ci si attende quindi che il segnale (**negativo**) dovuto al moto degli ioni sia diffuso su tutti gli anodi vicini a quello interessato → sembra impossibile una misura di posizione. Ma **Teorema di Ramo**

La corrente I_i che scorre in un particolare elettrodo i sotto l'influenza di una carica q che si muove ad x_1 con una velocità v può essere calcolata dalla:

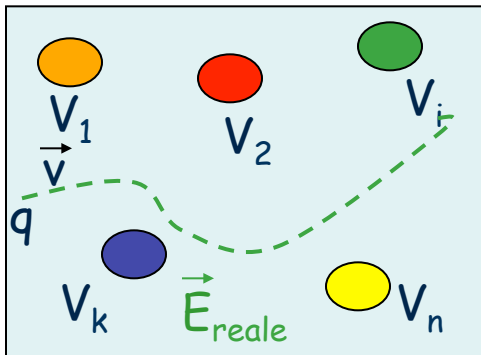
$$I_i = -q \cdot \frac{\vec{v} \cdot \vec{E}_i(x_1)}{V_i}$$

dove E_i è il campo creato mettendo l'elettrodo i alla tensione V_i ed a massa tutti gli altri in assenza della carica q .

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.

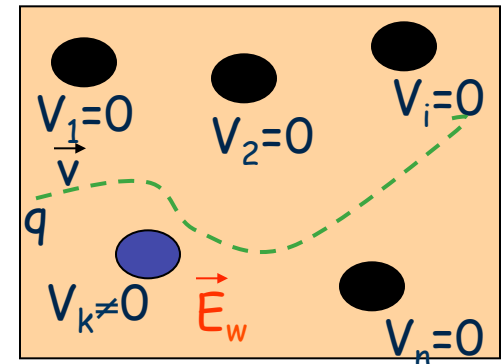
Il **teorema di Ramo (1939)** permette di calcolare **la corrente indotta su un elettrodo da una carica in moto** in una qualunque configurazione di elettrodi posti a potenziale elettrico $V_1, V_2, \dots V_n$.



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

$$V_{i \neq k} = 0$$

$$V_k \neq 0 (=1 \text{ V})$$

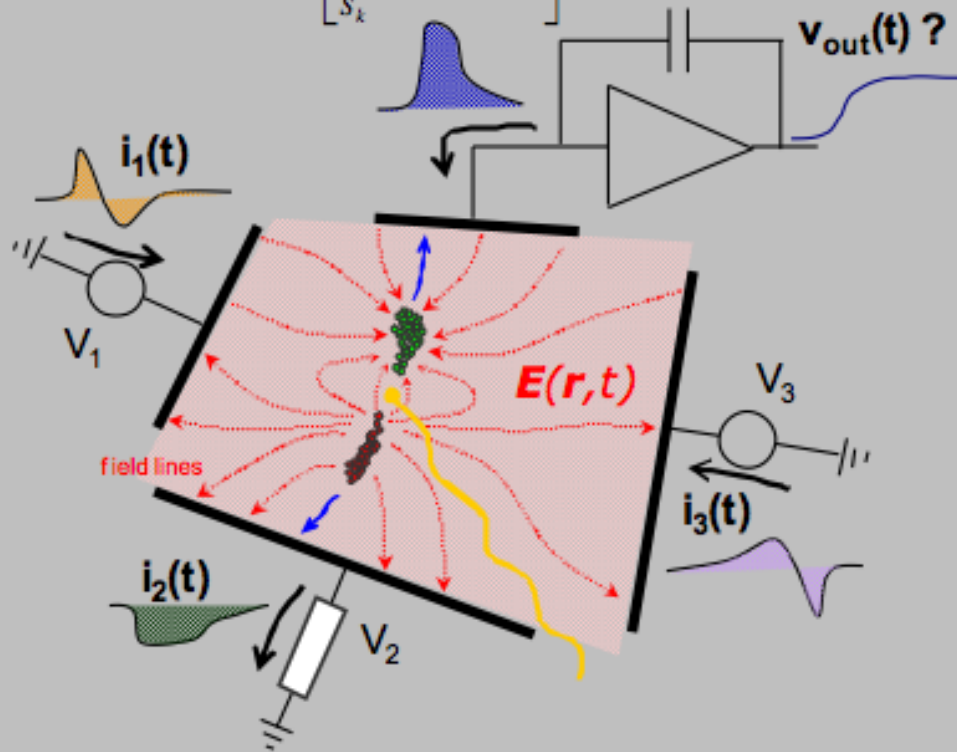


Il teorema di Ramo afferma che la **corrente indotta dalla carica q sull'elettrodo k e'**:

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

The problem of signal formation

$$i_k(t) = \frac{d}{dt} \left[\oint_{S_k} \epsilon E(r,t) \cdot dS \right] = ?$$



Concept of induced current on electrode k :
rate of change of electrostatic flux on the electrode surface (not the collection of charge by the electrode!!!)

• requires to compute the **total field** $E(x,y,z,t)$ (due to bias voltages, fixed space charge and moving charges) **at every time instant**, the integral of the flux on the electrode surface, etc.

Understanding signal formation is a crucial to optimize measurement quality of time, energy, position, shape,....

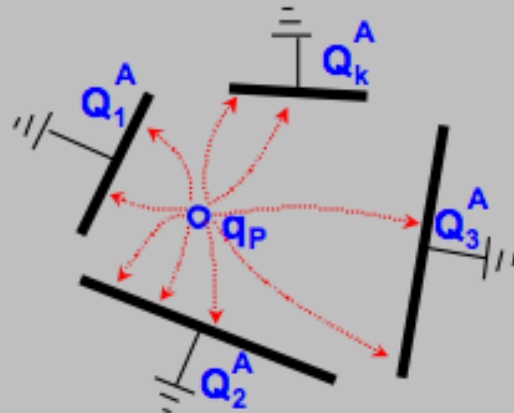
- collection time, amplitude, shape depend on type and point of interaction
- detector topology and readout must be jointly optimized for the desired observables
- "tomographic" view of the event, i.e. exploitation of signals on all electrodes'

Goal: the induced current on a given electrode as a function of the instantaneous position of the moving charges within the device

Ramo's Theorem - I

✓ Green's reciprocity theorem

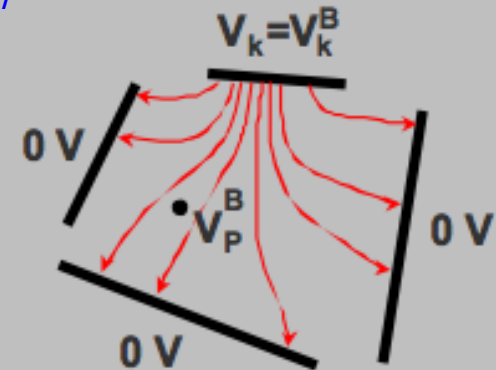
Click here for more on Green's reciprocity theorem: [CLICKME](http://physicspages.com/2012/04/02/greens-reciprocity-theorem/)
link to: <http://physicspages.com/2012/04/02/greens-reciprocity-theorem/>



q_P present, $V_k^A = 0$
(all electrodes grounded)

A, B are two possible sets
of {charges, potentials}
of the system of conductors

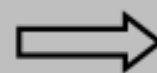
$$\sum_i Q_i^A V_i^B = \sum_i Q_i^B V_i^A$$



q_P removed, $V_k = V_k^B$
(other electrodes grounded)

✓ Charge induced by q_P

by reciprocity: $q_P V_P^B + Q_k^A V_k^B = 0$



$$Q_k^A = -q_P \frac{V_P^B}{V_k^B} = -q_P \tilde{V}_w$$

potential at P due to
electrode k at 1 V

charge induced by q_P
on electrode k

Ramo's Theorem - II

✓ **Current induced on electrode k by the motion of charge q :**

By reciprocity:

$$Q_k = -q_P \tilde{V}_w \longrightarrow i_k(t) = \frac{dQ_k}{dt} = -\frac{d(q_P \tilde{V}_w)}{dt} = -q_P \frac{d\tilde{V}_w}{dt} \cdot \frac{d\vec{l}}{d\vec{l}} = -q_P \frac{d\tilde{V}_w}{d\vec{l}} \cdot \frac{d\vec{l}}{dt}$$

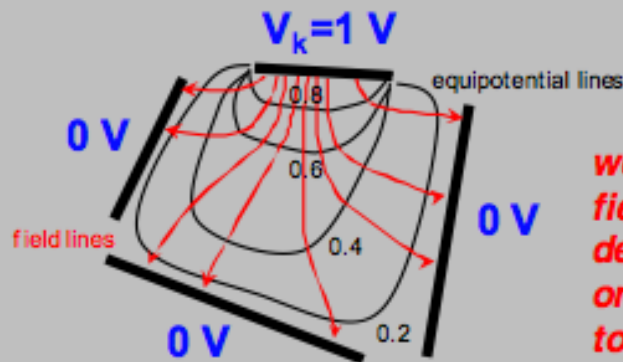
$$i_k(t) = q_P \tilde{E}_w \cdot v(x(t), y(t), z(t))$$

weighting field:

$$\tilde{E}_w = -\text{grad } \tilde{V}_w$$

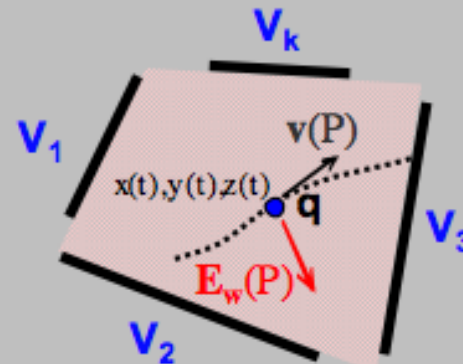
true carrier velocity:

$$v = \mu E(x(t), y(t), z(t)) \quad (\text{here charge transport by drift is assumed})$$



weighting field/potential depends only on device topology (Laplace eq.)

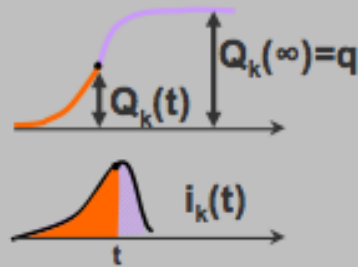
($V_k=1$ V, all others grounded)



carrier trajectory computed in the true electric field (i.e. with bias voltages, fixed space charge, etc.)

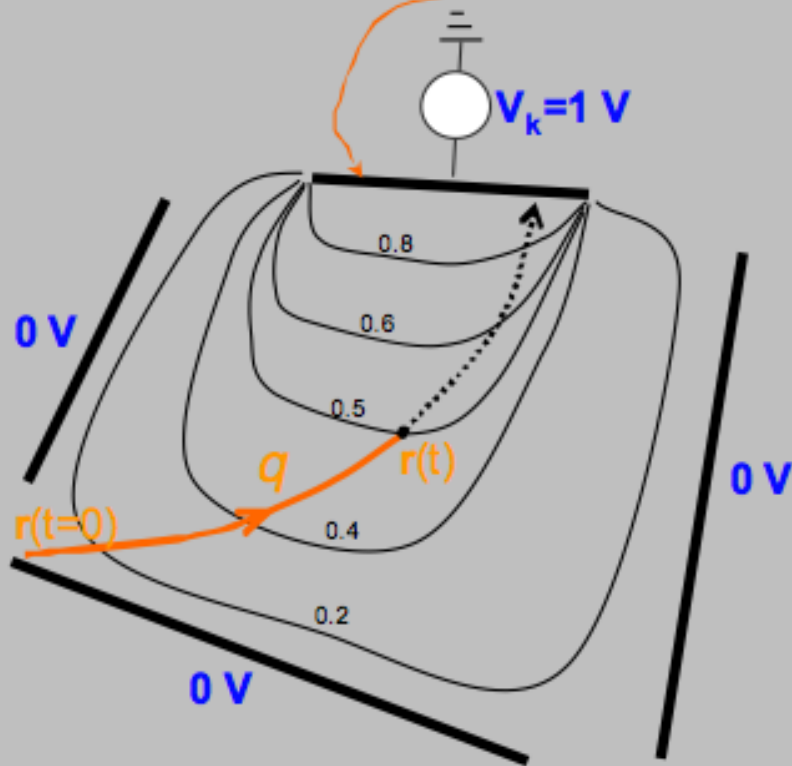
Ramo's Theorem - III

the **induced charge** can be computed directly on the **weighting potential map** (depends only on moving charge and topology of device)



$$Q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau =$$

$$q \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}_w \cdot d\vec{l} = -q [V_w(\vec{r}) - V_w(\vec{r}_0)]$$



Limitations of Ramo's theorem

▪ assume **instantaneous field propagation** (i.e. transit time of charges longer than propagation of the field across the volume)

- q non-relativistic (but electron saturation velocity @RT in Si $\sim c/3000$)
- electrode voltages must not vary too fast

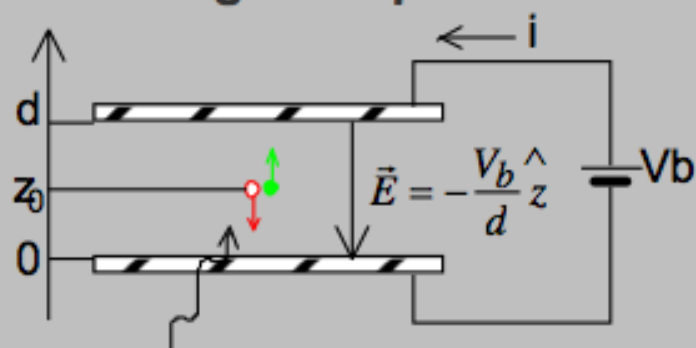
Generalizations

- multiple moving charges
- non-uniform or non-isotropic dielectric constant
- other transport modalities (thermal broadening, ballistic motion, etc.) driven by continuity equation

Signal Formation and Ramo's theorem - I

✓ *Induced current (charge) in planar electrode geometry*

Single e-h pair

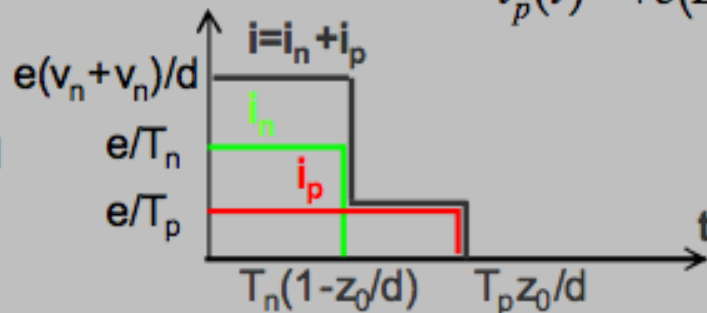


$$\mathbf{E}_w = -\frac{1}{d} \hat{z} \quad \text{weighting field}$$

$$i_n(t) = -e(-E_w v_n) = e \frac{v_n}{d} = e \frac{1}{T_n} \quad 0 \leq t \leq T_n(1 - z_0/d)$$

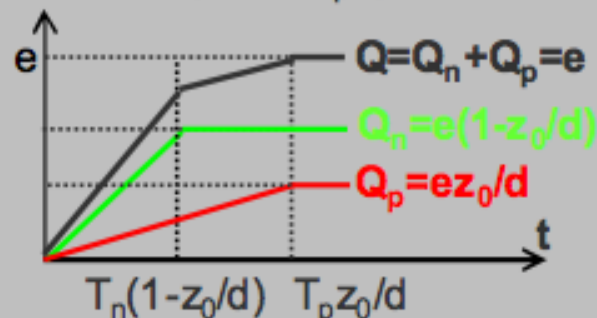
$$i_p(t) = +e(E_w v_p) = e \frac{v_p}{d} = e \frac{1}{T_p} \quad 0 \leq t \leq T_p \frac{z_0}{d}$$

induced
current
 $i(t)$



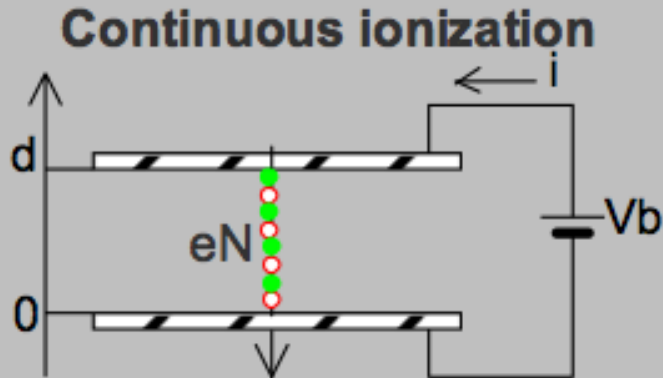
induced
charge

$$Q(t) = \int i(t) dt$$



Signal Formation and Ramo's theorem - III

✓ Induced current (charge) in planar electrode geometry



The theorem applies to current induced by the drifting charges in dx at a given depth

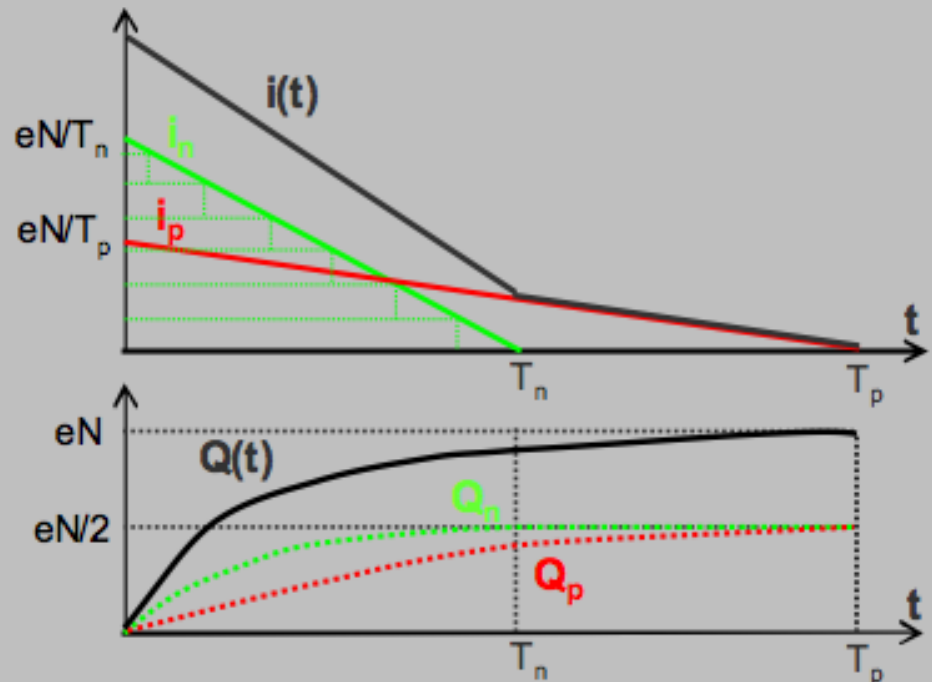
induced current

induced charge

$$E_w = -\frac{1}{d}k \quad \text{weighting field}$$

$$i_n(t) = eN \frac{v_n}{d} (1 - t/T_n) = \frac{eN}{T_n} (1 - t/T_n) \quad 0 \leq t \leq T_n$$

$$i_p(t) = eN \frac{v_p}{d} (1 - t/T_p) = \frac{eN}{T_p} (1 - t/T_p) \quad 0 \leq t \leq T_p$$



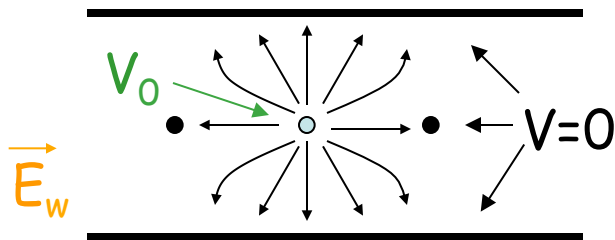
Forma del segnale

$$E = \frac{\lambda V_0}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r}$$

Gli elettroni vengono raccolti in pochi ns.

E' la **deriva degli ioni**, molto piu' lenti, ad **indurre la parte principale del segnale**. Usiamo il teorema di **Ramo**:

λ e' la capacita' per unita' di lunghezza



$$\vec{E}_{reale} = \vec{E}_w = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad \vec{v} = \mu \vec{E}$$

$$I = -q \frac{\vec{v} \cdot \vec{E}}{V_0} = -\frac{q\mu}{V_0} \frac{\lambda^2}{(2\pi\epsilon_0)^2} \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\mu\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \rightarrow r = \sqrt{a^2 + \frac{\mu\lambda t}{\pi\epsilon_0}}$$

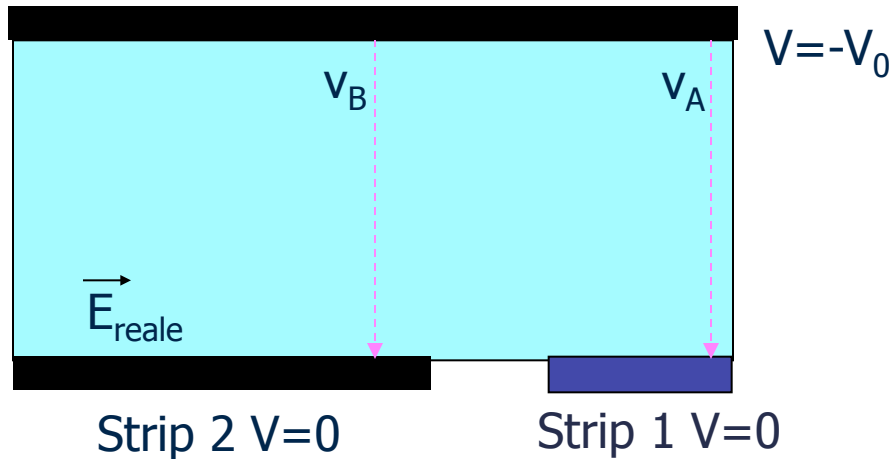
$$I = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{t_0 + t}$$

NB: $V_0 = 1 \text{ V}$

Un' interessante conseguenza e' il noto fenomeno per cui il segnale indotto sul **filo vicino a quello su cui si sviluppa la valanga ha segno opposto**.

Esempio: carica in campo uniforme

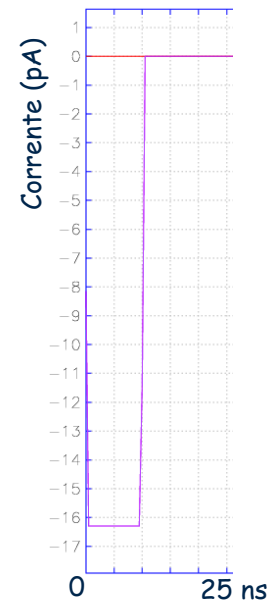
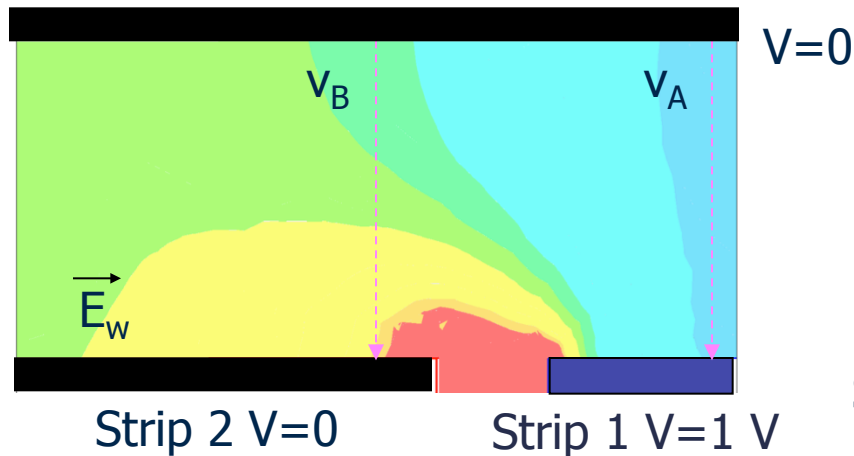
Prendiamo una carica in moto in un rivelatore piano con lettura a strip.



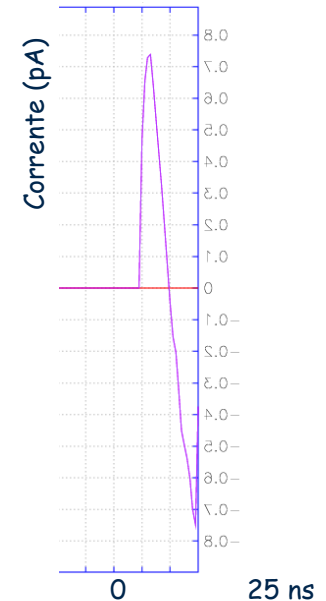
Calcoliamo il segnale indotto sulla strip 1 da un elettrone con velocità v_A o v_B .

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

Introduciamo il “weighting field”



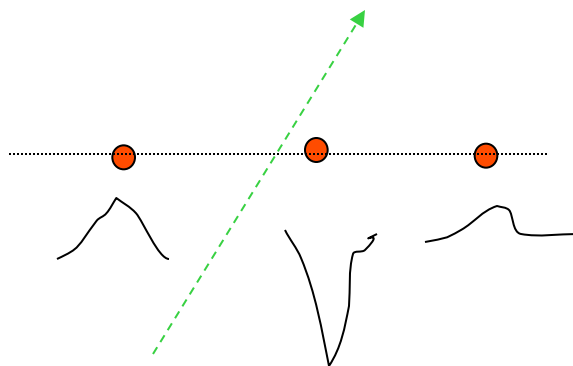
Segnale indotto sulla strip 1 nel **caso A**



Segnale indotto sulla strip 1 nel **caso B**

Camere proporzionali (MWPC)

Per il teorema di Ramo E_i ha direzione opposta per gli anodi vicini rispetto a quello considerato → il segnale sugli anodi vicini è **positivo** e, in gran parte, compensa il segnale **negativo** dovuto all'accoppiamento capacitivo.

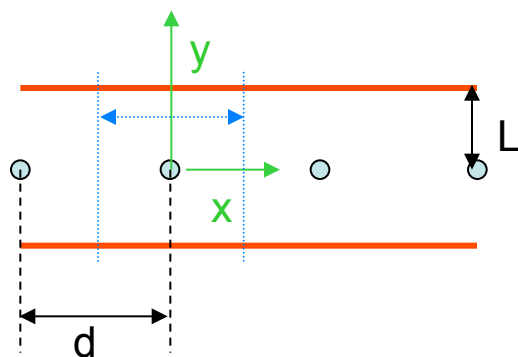


Il segnale sugli anodi vicini è piccolo e di segno opposto

Camere proporzionali (MWPC)

Scelta dei parametri geometrici.

Se usiamo una camera proporzionale quale misura di posizione ovviamente più vicini sono i fili anodici e maggiore sarà la risoluzione spaziale.



$$\sigma_x = d/(12)^{1/2}$$

risoluzione

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\pi L/d - \ln(\pi a/d)}$$

Capacità per unità di lunghezza

$$M \approx ke^{CV_0}$$

guadagno

valido per $V_0 \gg$ del voltaggio di soglia per creare una valanga V_T

Per uno spessore del filo costante, se vogliamo mantenere fisso il **guadagno** dobbiamo mantenere costante la carica per unità di lunghezza (CV_0), cioè aumentare V_0 se diminuiamo d (e quindi C) → **rischio di cattivo funzionamento al di sopra di un certo valore.**

Camere proporzionali (MWPC)

L (mm)	2a (μm)	d(mm)			
		1	2	3	5
8	10	1.94	3.33	4.30	5.51
	20	2.00	3.47	4.55	5.92
	30	2.02	3.56	4.70	6.19
4	10	3.47	5.33	6.36	7.34
	20	3.63	5.71	6.91	8.10
	30	3.73	5.96	7.28	8.58

Capacità per unità di lunghezza (pF/m) per diverse geometrie di camere proporzionali piane.

L = Distanza filo anodico catodo; a = raggio del filo anodico; d = distanza fra i fili anodici

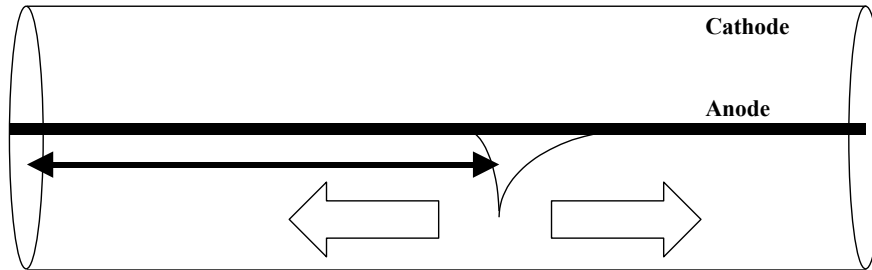
MWPC

- Le camere a filo danno direttamente la coordinata nel piano \perp al filo.
- Non c'e' informazione sulla posizione LUNGO il filo anodico.
- La seconda coordinata puo' essere ottenuta con:
 - divisione resistiva sul filo
 - strip catodiche
 - Piu' piani di fili ortogonali
 - Misure di tempo di arrivo del segnale alle estremita' del filo

Two Dimensional Readout: Use of Timing

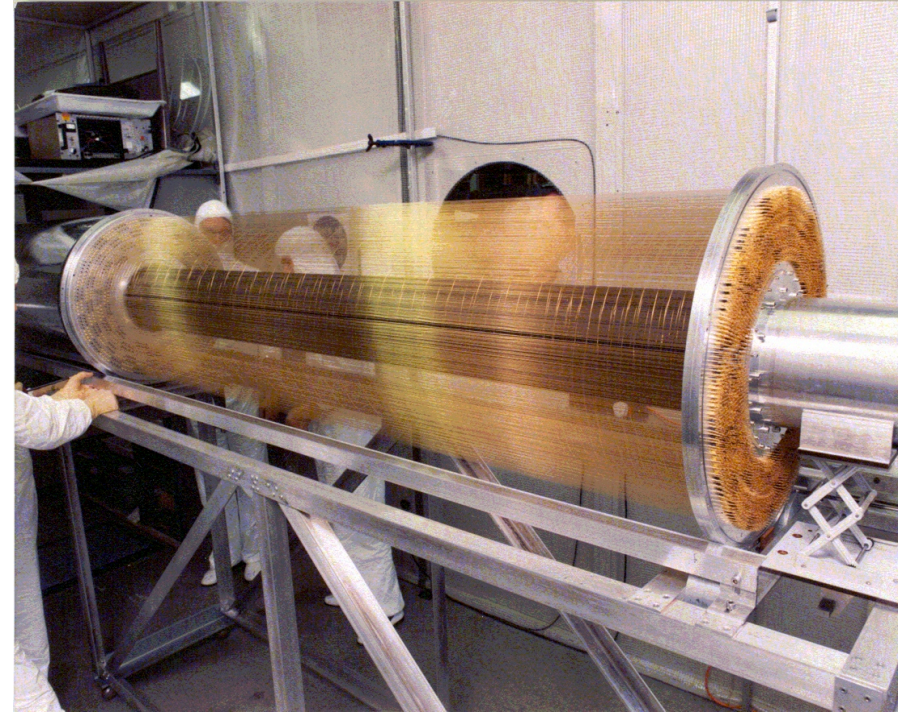
- Example: ALEPH Inner Tracking Chamber

Distance can be estimated by measuring the time difference



The speed of transmission along the wire is close to c

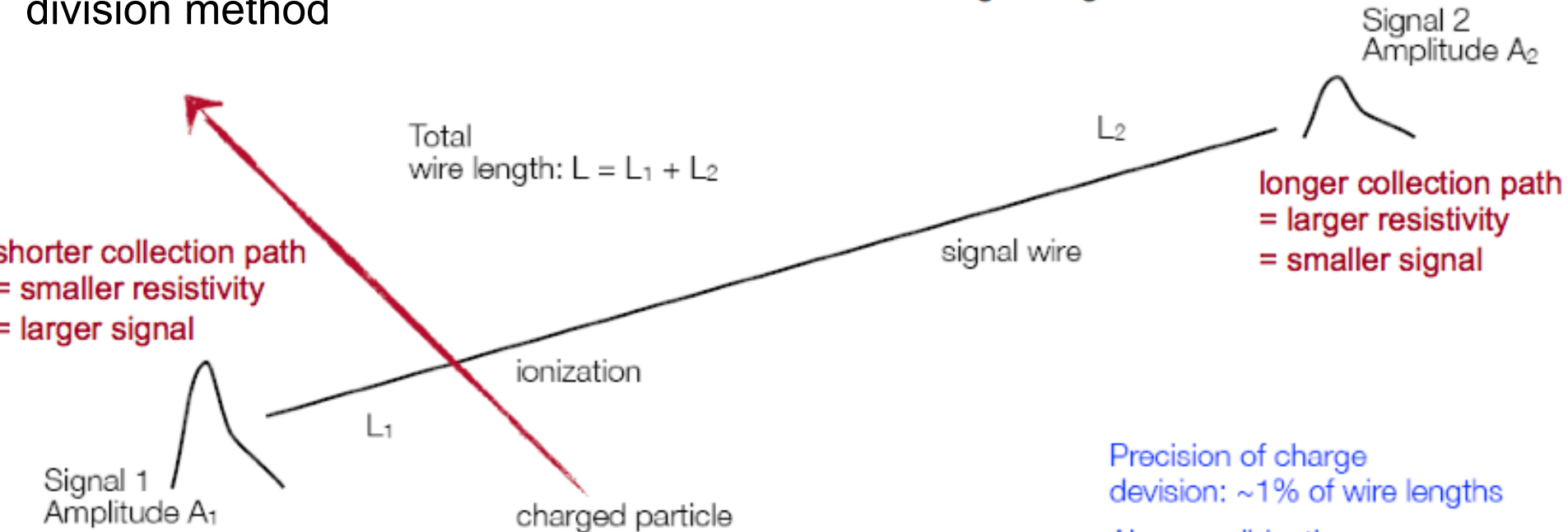
Note that $c \approx 1\text{ns/m}$, so cm precision requires 50ps timing resolution



- 960 anode wires 2m long with 6 cathode wires per anode forming a hexagonal cell
- Ar/CO₂ (80%/20%) gas mixture at atmospheric pressure
- Drift coordinate precision about 200 μm , **2nd coordinate 5cm**

Principle of charge division method

: measure the coordinate along the signal wire



Precision of charge
division: ~1% of wire lengths
Also possible: time
measurement on both ends

Determination
of L_1 , L_2 :

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_2}{L_1}$$

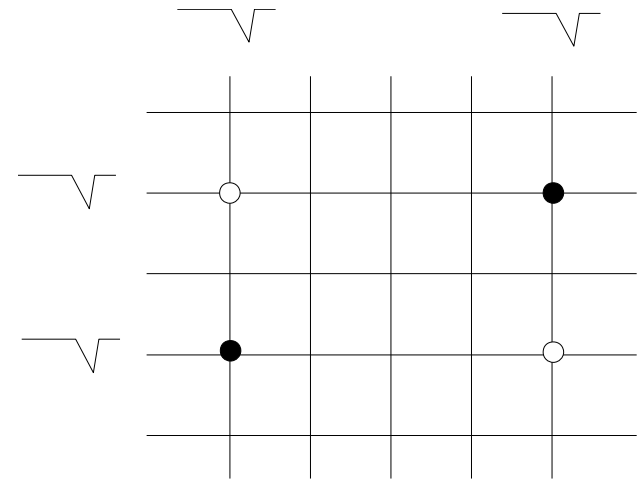
$$L_2 = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot L \quad L_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot L$$

Camere proporzionali (MWPC)

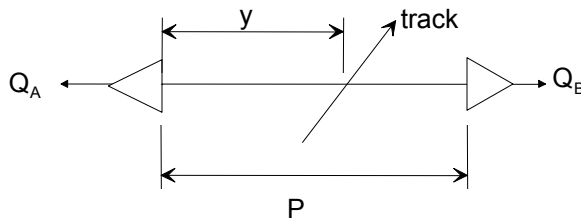
Lettura della seconda coordinata.

Più di un piano anodico, cioè' due MWPC ortogonali. Segnali spuri: piu' di un filo colpito (dovuti a canali rumorosi, altre particelle, es δ) → Problemi con il pattern recognition.

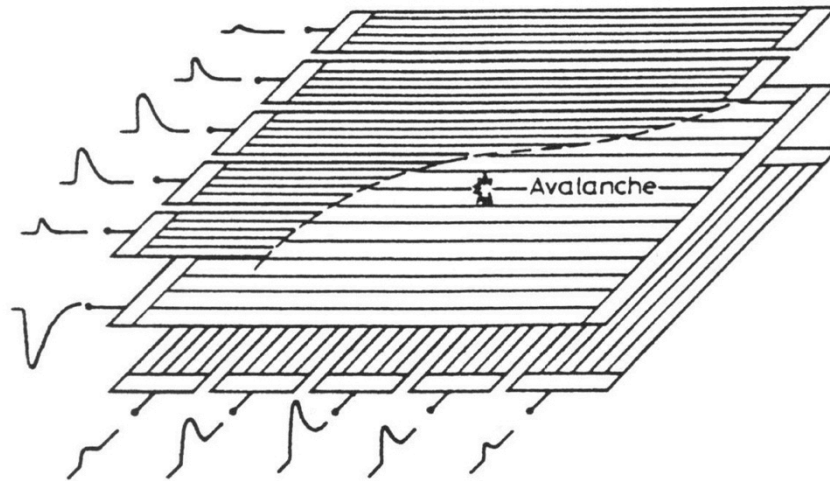
Se solo 2 piani limitata a basse molteplicità. Piani stereo (x,u,v) per eliminare i segnali spuri: i piani catodici e/o anodici sono ruotati di un angolo stereo



- Divisione di carica Fili resistivi (Carbon, 2k Ω /m).



$$\frac{y}{P} = \frac{Q_B}{Q_A + Q_B} \quad \sigma\left(\frac{y}{P}\right) \text{ up to } 0.4\%$$



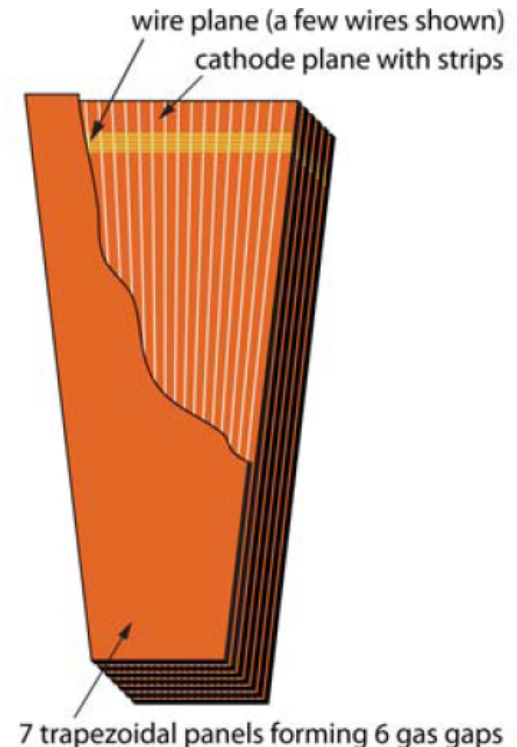
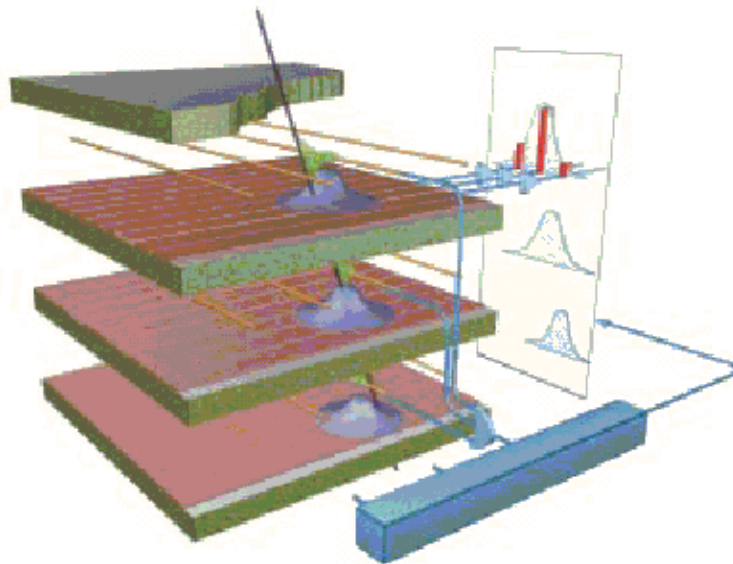
$$y = \frac{\sum (Q_i - b) y_i}{\sum (Q_i - b)},$$

Two Dimensional Readout: Cathode Strips

- So far we have talked only about reading out from the anode but a signal is also induced in the cathode. Signals can be detected in several strips of a segmented cathode and the position deduced by interpolation of the signal on several strips.

CMS Cathode Strip Chambers (Muon endcaps)

Principle of Operation



Camere proporzionali (MWPC)

■ Strip Catodiche

Divido il catodo in strisce sottili (ortogonali) al filo. La presenza di una carica q vicinissima ad un certo anodo induce una distribuzione di carica σ sul catodo. (Si calcola col metodo delle cariche immagine $-q$ simmetrica a q , creo un dipolo e ricavo σ integrando). La risoluzione spaziale che si ottiene e':

$$\sigma(y) = \frac{-q}{4L} \operatorname{sech} \frac{\pi y}{2L}$$

Tipicamente e' dell'ordine del mm

essendo y la distanza lungo l'anodo, catodo ortogonale all'anodo ed L separazione anodo-catodo.

Se il catodo è diviso in strisce si calcola y dal centro di gravità.

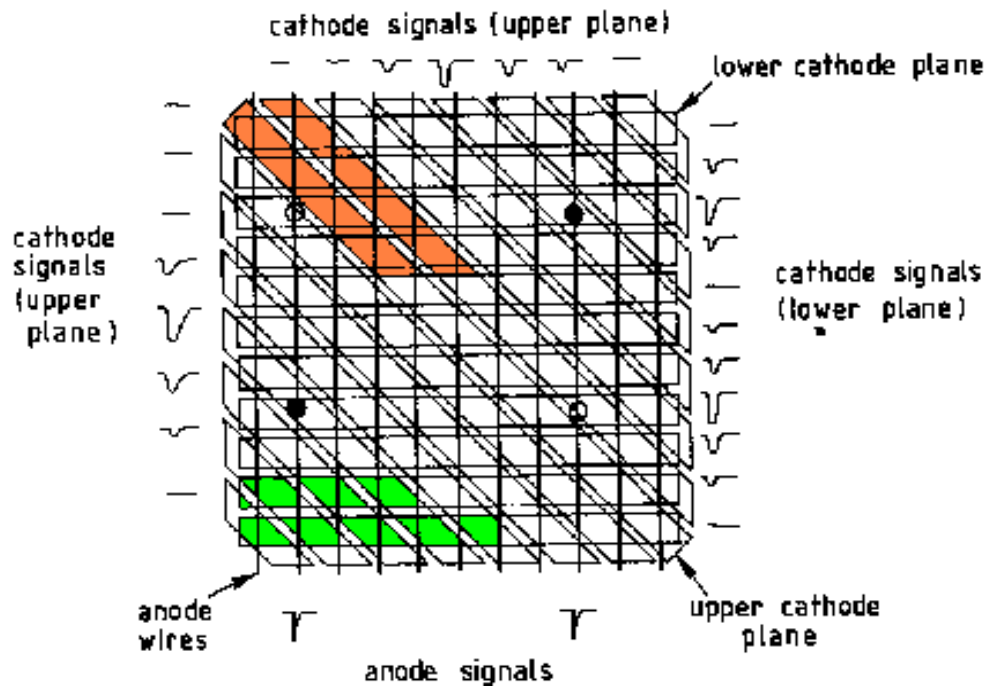
$$y = \frac{\sum q_i y_i}{\sum q_i}$$

Tipicamente e' dell'ordine delle centinaia di micron

Camere proporzionali (MWPC)

- 1 piano di fili
+ 2 piani catodici
segmentati

Analog readout of
cathode planes.
→ $\sigma \approx 100 \mu\text{m}$



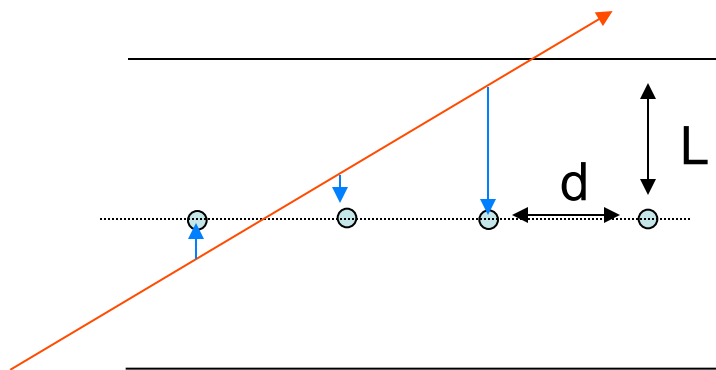
Le strip catodiche diagonali permettono di eliminare l'ambiguità degli hit. L'ambiguità è dovuta al fatto che il punto di passaggio P va determinato a partire dai segnali di fili indipendenti che devono essere combinati.

Camere proporzionali (MWPC)

Clusters.

Più di un filo può essere colpito perché:

- i. la traccia può attraversare la camera ad un angolo
- ii. la presenza di raggi δ energetici può confondere la situazione.



Siccome la distanza delle coppie elettroni-ioni dagli anodi è diversa i segnali sui fili colpiti saranno distanziati in tempo a seconda del tempo di deriva degli elettroni.

Il segnale che vogliamo tenere è quello che arriva prima.

Camere proporzionali (MWPC)

Per abolire i segnali ritardati in modo da limitarci a segnali da solo 1 o 2 fili (dipende dall'angolo della traccia e dalla sua posizione) si può:

- **Aggiustare il gate dell'elettronica di lettura in modo da tenere solo i segnali più rapidi.** (In una camera tipica con $L=8\text{mm}$ e $d=2\text{mm}$ il tempo minimo del gate che permette di mantenere una buona efficienza della camera è $\sim 30\text{ns}$.)
- **Aggiungere dei gas elettronegativi.** Elettroni prodotti più lontani si ricombinano più facilmente → non arrivano abbastanza vicino all'anodo per produrre una moltiplicazione a valanga → **si limita il numero dei fili colpiti.**

Camere proporzionali (MWPC)

Efficienza delle MWPC.

L'efficienza intrinseca di una MWPC dipende dal numero delle coppie ione-elettrone prodotte e raccolte. → dipende dal dE/dx del gas, dalla larghezza della gap L , dalla pressione del gas, dalla quantità di atomi elettronegativi, dall'alta tensione applicata, dalla soglia del discriminatore, dalla larghezza del gate, da quanto si differenzia il segnale

Nell'ipotesi che la camera sia stata progettata correttamente per quanto riguarda la scelta del gas e la larghezza della gap, ciò che determina l'efficienza è l'alta tensione e l'elettronica di front-end (amplificatore e discriminatore).

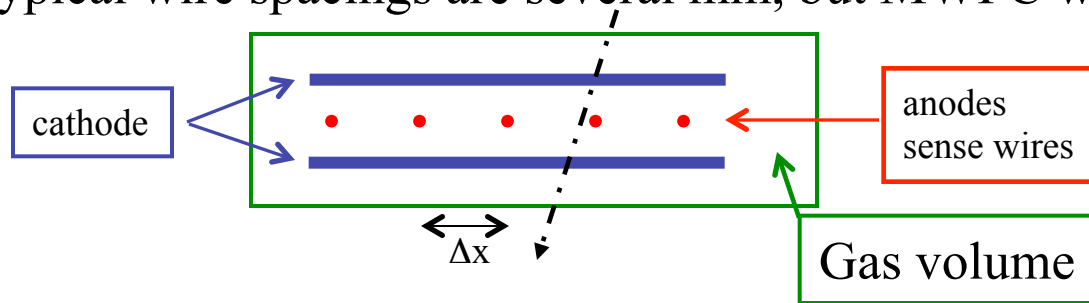
Tipicamente le camere hanno un'efficienza $\sim 99\%$, con la giusta alta tensione (in plateau) e una soglia non troppo alta.

Multiwire Proportional Chamber (MWPC)

The spatial resolution (σ) of an MWPC is determined by the sense wire spacing (Δx) if there is charge sharing:

$$\sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{12}}$$

Typical wire spacings are several mm, but MWPC with 1mm spacing have been built.



Advantages of MWPC:

- can cover large area
 - systems with thousands of wires
 - planar or cylindrical geometry
- can get pulse height info
 - dE/dx
 - position info along wire using charge division
- easy to get a position measurement (digital)
- can handle high rates
- works in magnetic field
- easy of construction

Disadvantages of MWPC:

- poor spatial resolution* it may be improved by charge sharing down to $d/10$
- elaborate electronics
- need low noise premps
- miniaturization of electronics
- elaborate gas system
- must understand electrostatics
- forces on wires

Regime saturato

Regione di amplificazione saturata.

Se si aggiungono piccole quantità di elementi elettronegativi quali freon (CF_3Br) si possono raggiungere guadagni fino a 10^7 prima della scarica. (Salendo un po' con la tensione).

Questo comportamento fu osservato per la prima volta da Charpak e collaboratori utilizzando il cosiddetto **gas magico** argon-isobutano-freon nelle proporzioni **70:29.6:0.4**.

Il vantaggio di operare le camere in regime saturato consiste nella semplificazione dell'elettronica di lettura in quanto abbiamo un segnale più alto ed un range dinamico più basso → ad esempio spesso non serve un amplificatore.

D'altra parte in regime saturato si perde la proporzionalità con la carica rilasciata e quindi la possibilità di una misura di dE/dx .



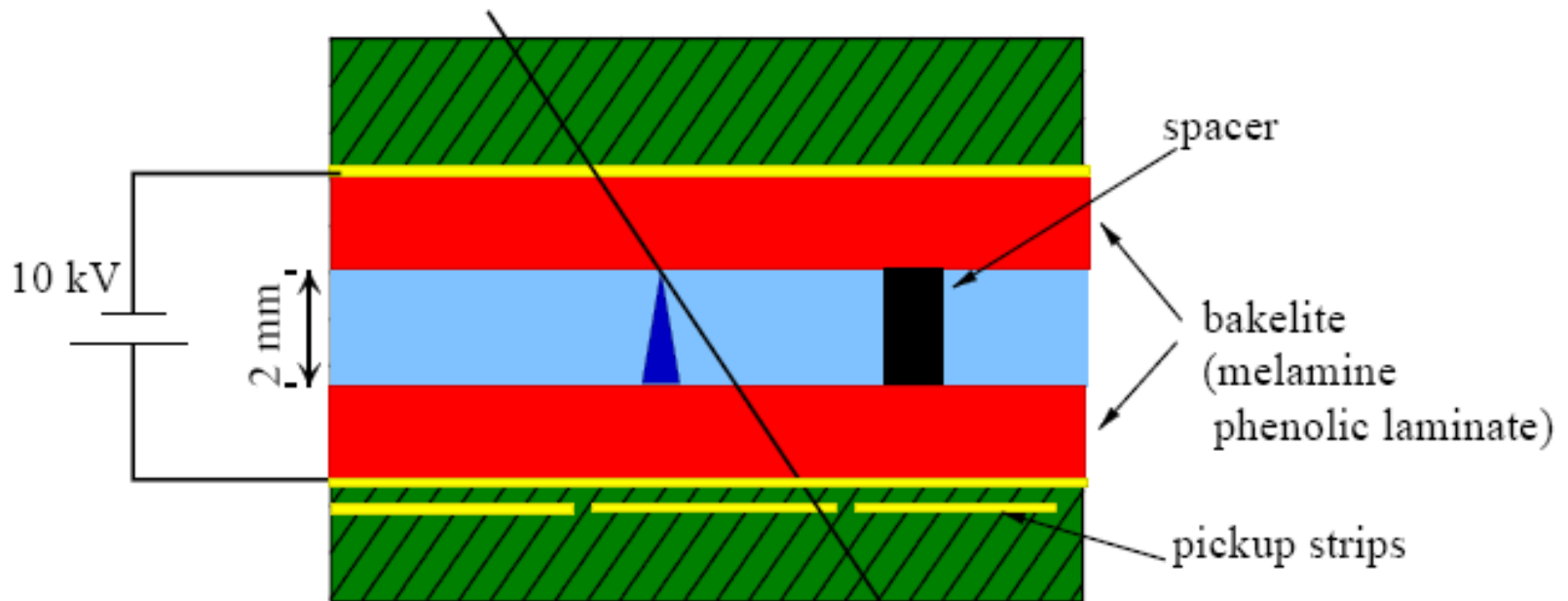
Camere operate in regime saturato sono utilizzate solo per misure di posizione.

Resistive Plate Chambers (RPC' s)

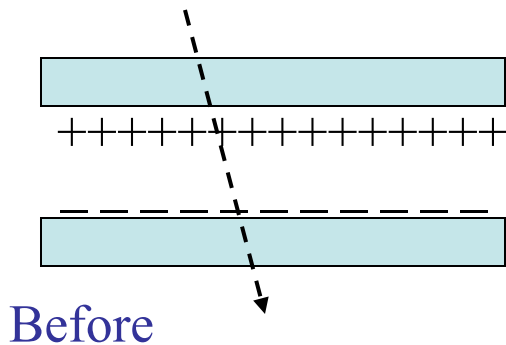
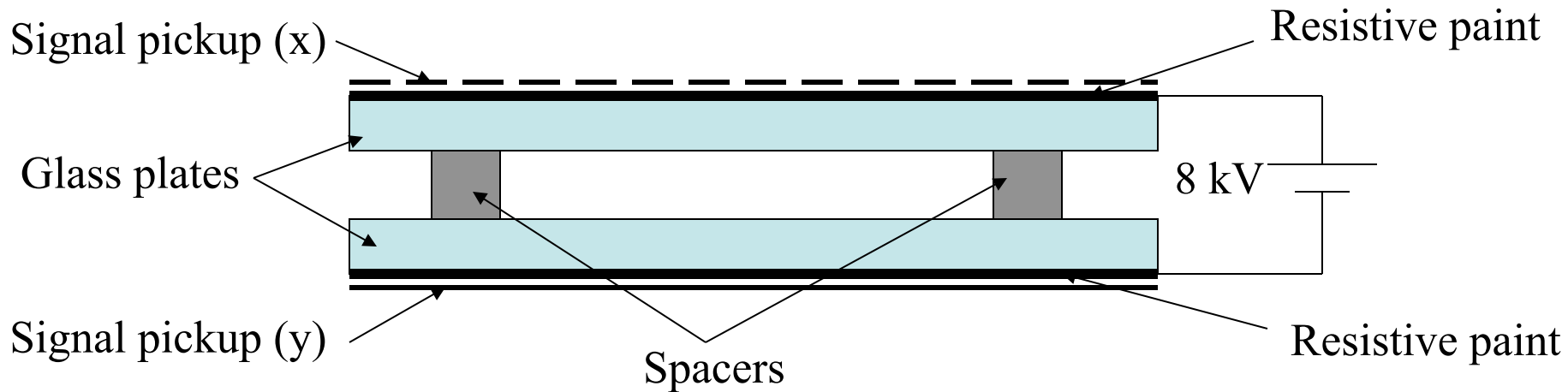
➤ Principle of operation

- Very high electric field (few kV/mm) induces avalanches or streamers in the gap
- High resistivity material localizes the avalanche
- Signal is induced on the readout electrodes

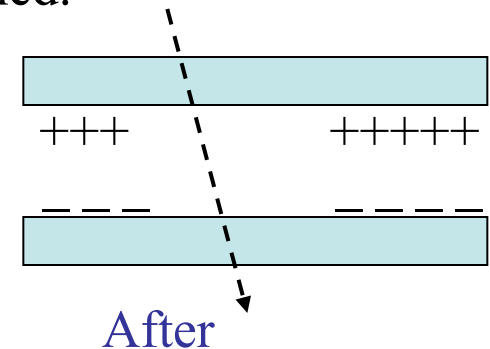
Typical gas: $\text{C}_2\text{F}_4\text{H}_2$, $(\text{C}_2\text{F}_5\text{H})$ + few % isobutane



RPC Principles of Operation



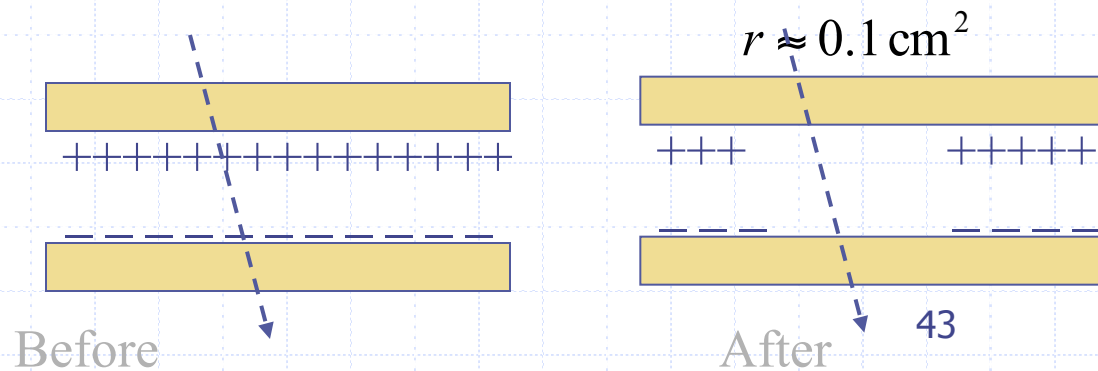
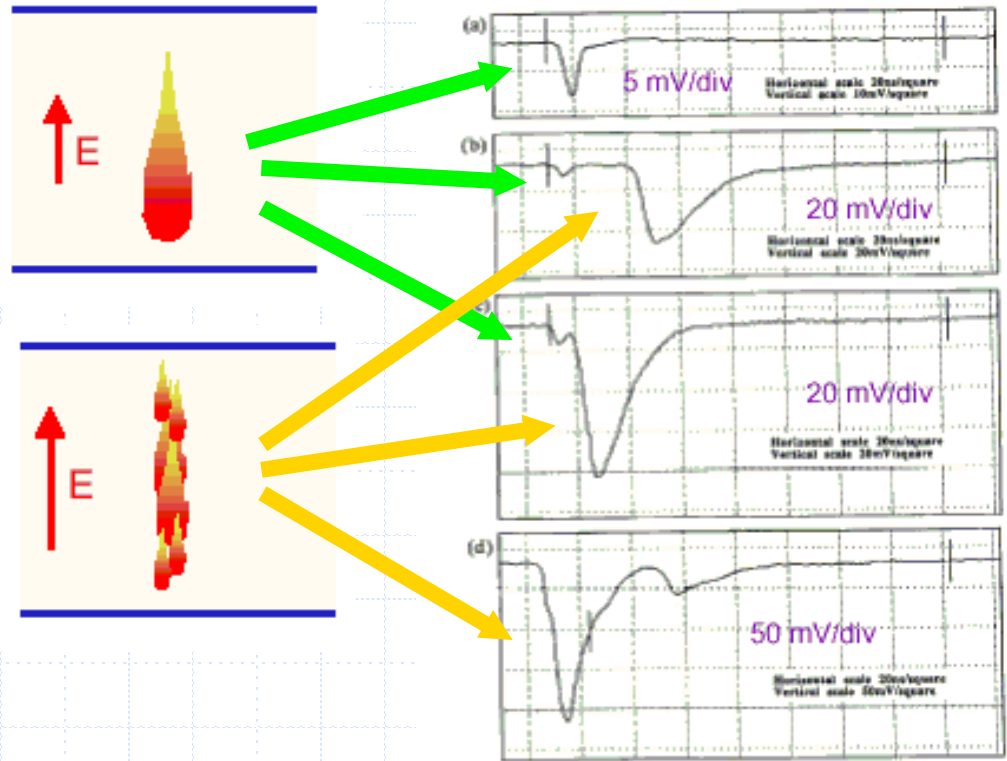
A passing charged particle induces an avalanche, which develops into a spark. The discharge is quenched when all of the locally ($r \approx 0.1 \text{ cm}^2$) available charge is consumed.



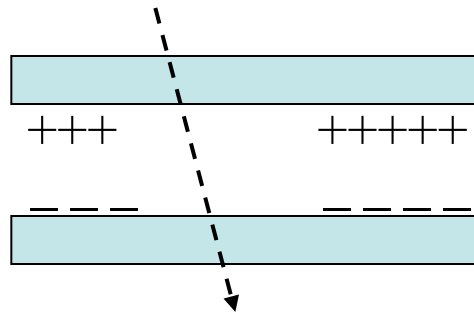
The discharged area recharges slowly through the high-resistivity glass plates.

RPC' s

- Avalanche mode
 - Like a proportional chamber
- Streamer mode
 - Small “spark”
- Excellent time resolution
 - 1-2 ns
- In both cases charge must recover to re-establish E field after avalanche or streamer



Principles of Operation: Rate Capability



As noted, each discharge locally deadens the RPC. The recovery time is approximately

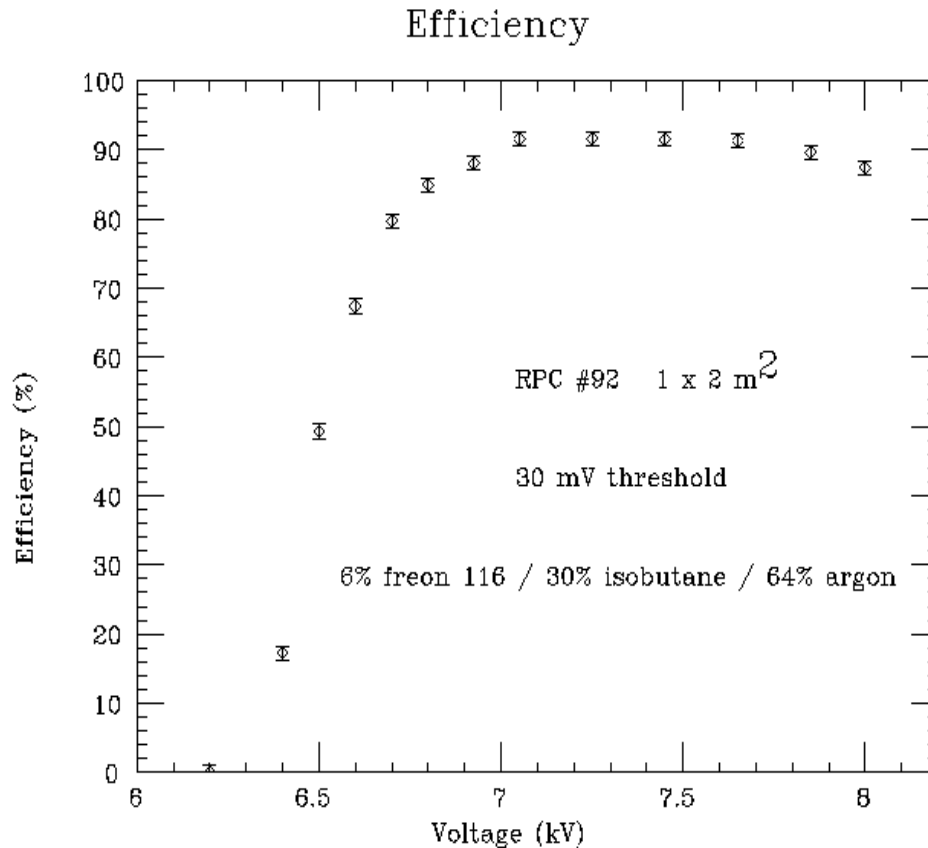
$$\tau = RC \cong \left(\frac{\rho l}{A} \right) \left(\frac{\kappa \epsilon_0 A}{l} \right) = \rho \kappa \epsilon_0$$

Numerically this is (MKS units)

$$\tau = (5 \times 10^{10}) \times 4 \times (8.85 \times 10^{-12}) = 2 \text{ s}$$

Assuming each discharge deadens an area of 0.1 cm^2 , rates of up to 1 kHz/m^2 can be handled with 1% deadtime or less.

Plateau Curve

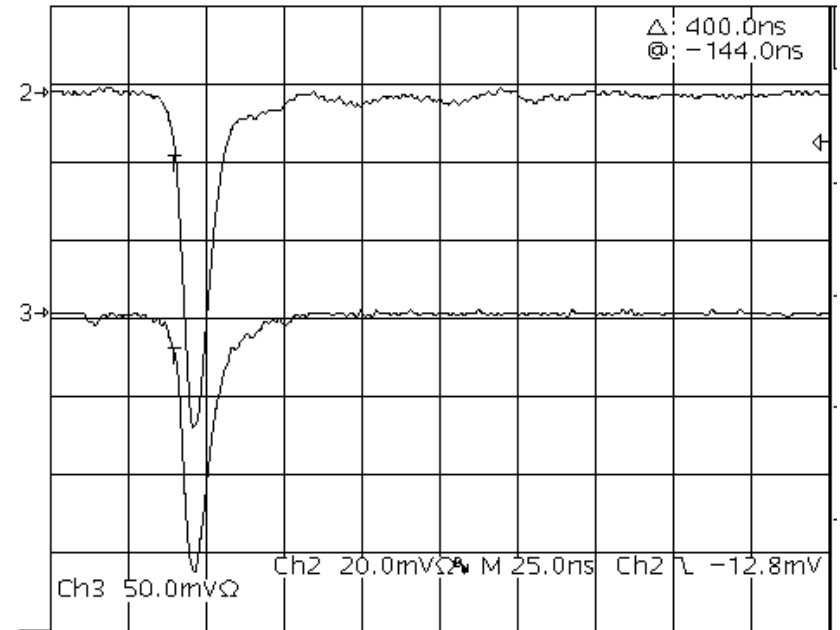
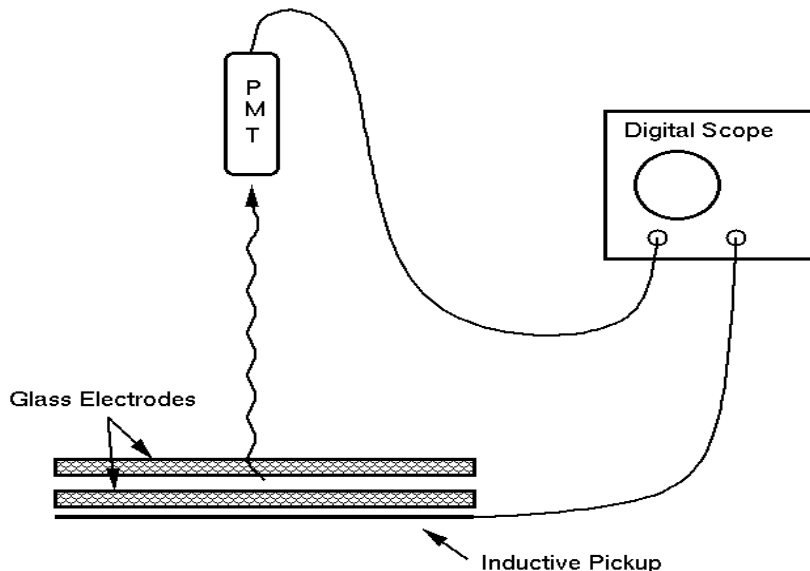


2 mm gap RPCs plateau at a fairly high voltage.

Note the slight falloff in efficiency well above the plateau. This effect is real and typical due to recombination.

Pulse Shape

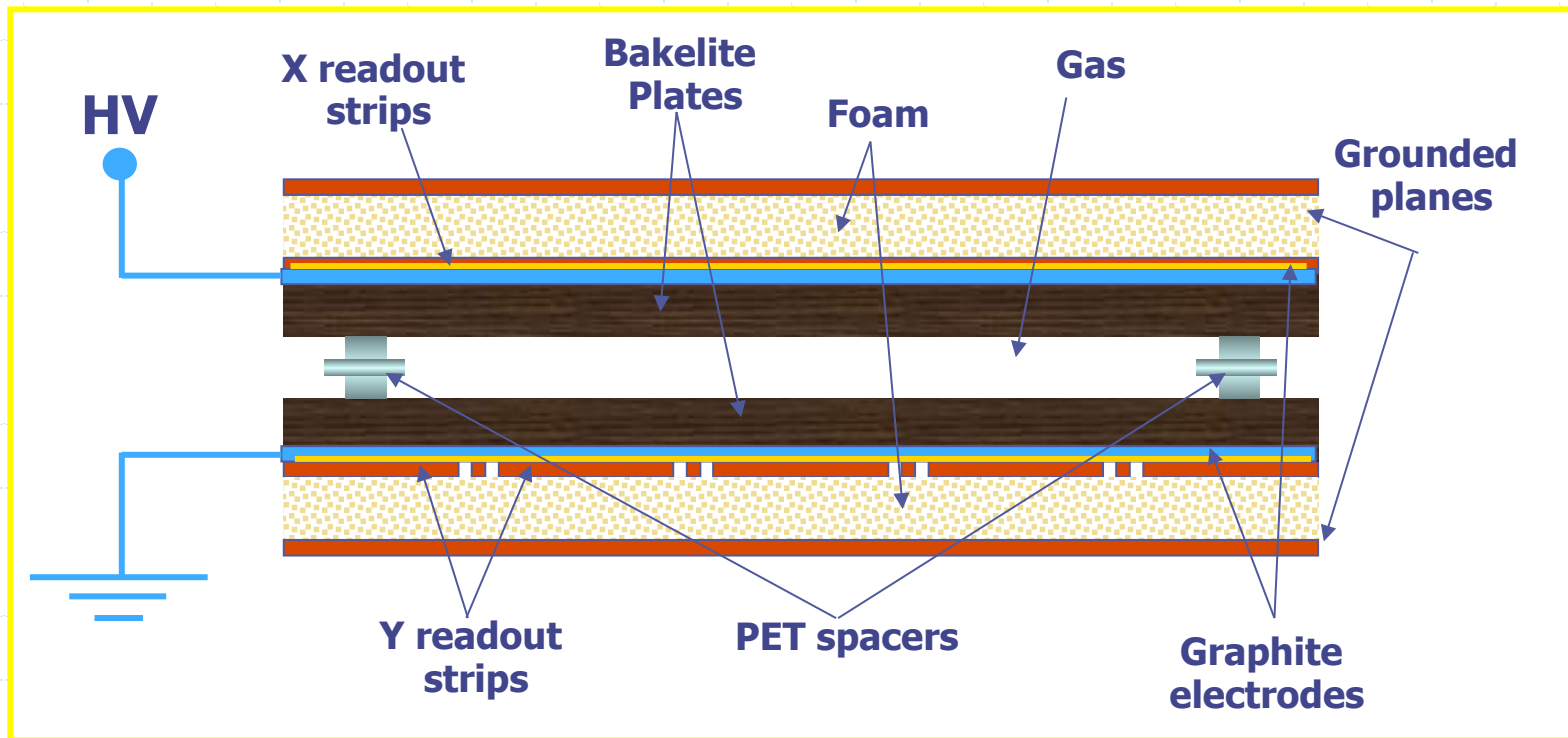
One interesting feature of RPCs is that the signal can be observed both using a pickup electrode and by viewing the light signal using a PMT.



e pulses are large ($\sim 100\text{ mV}$ into 50 ns) and fast (FWHM $\sim 15\text{ns}$) \rightarrow Good trigger

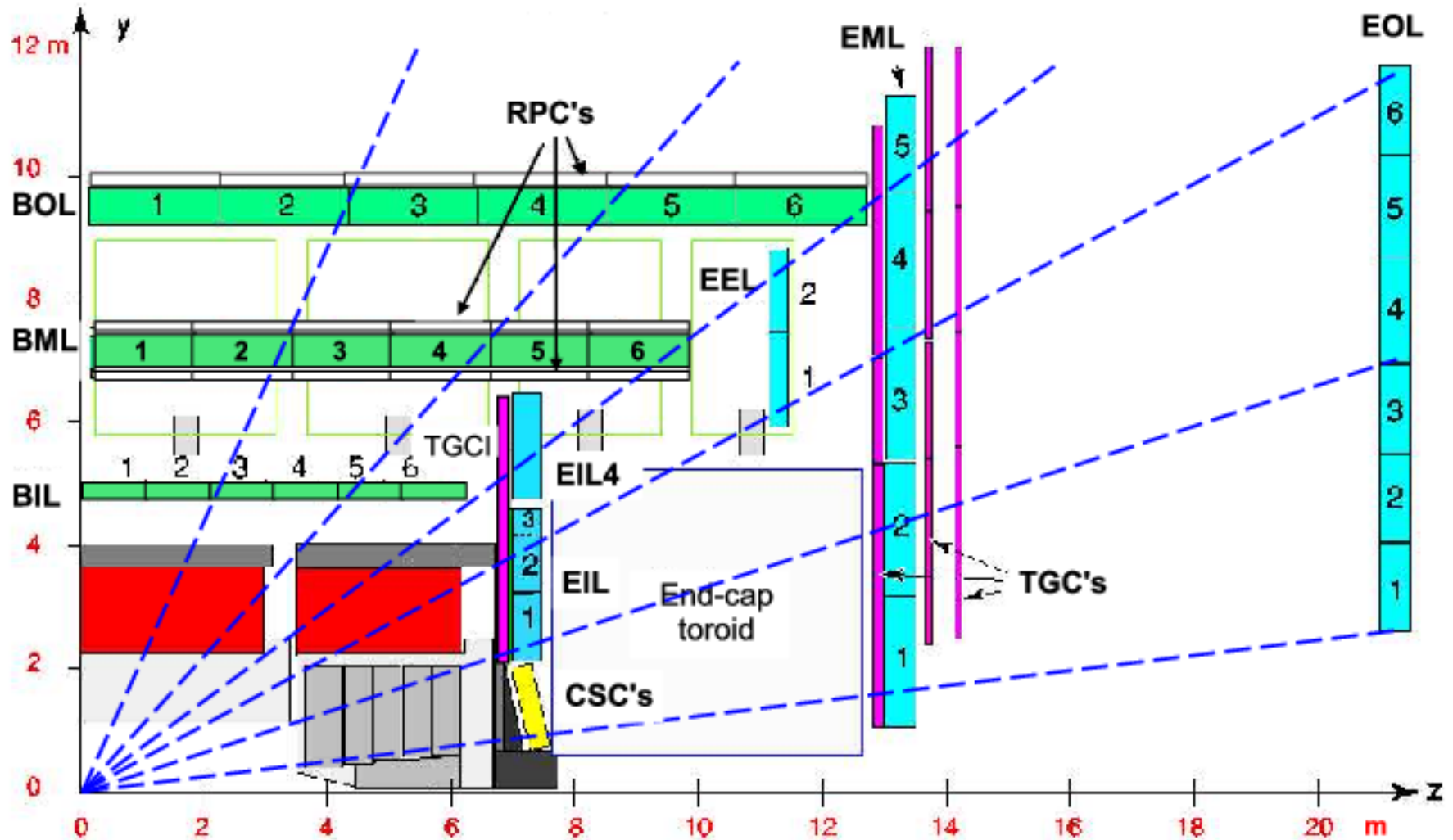
There is a very good correlation between the electronic and the light signal.

ATLAS RPC's

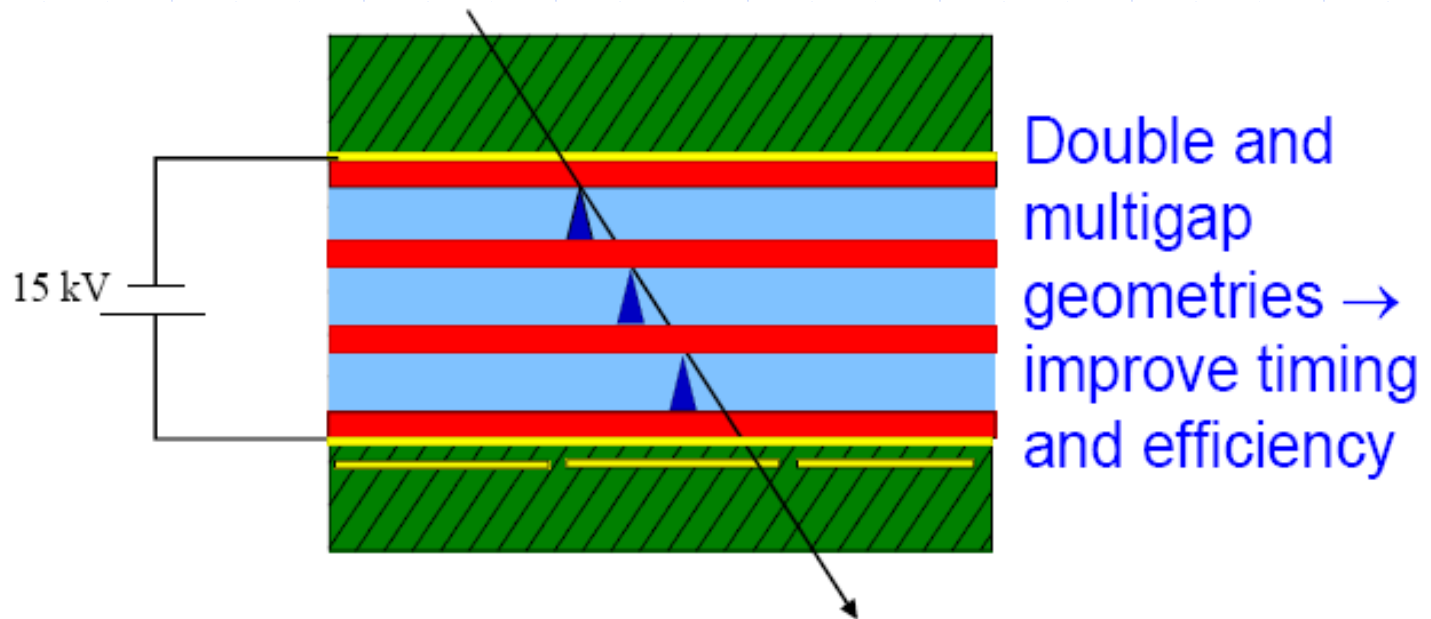


2mm gas gap
8.9kV operating voltage

ATLAS muon spectrometer

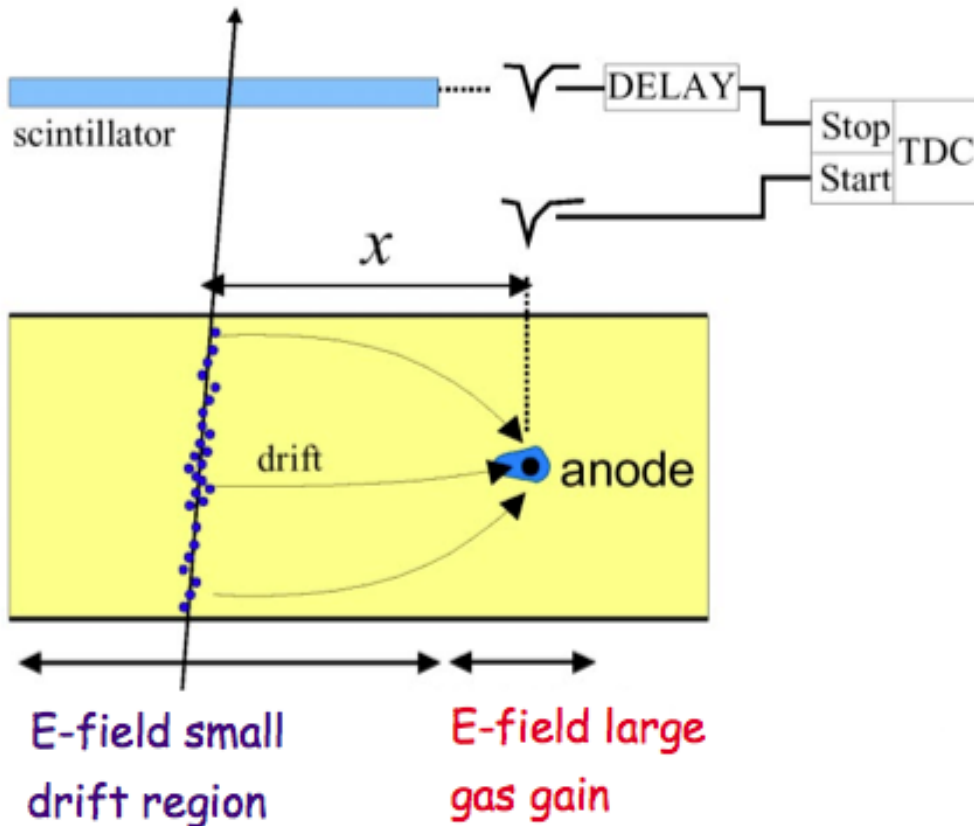


RPC's



Camere a deriva

Possono essere considerate come derivate delle camere proporzionali. In questo caso ricavo la coordinata misurando un tempo.



TDC: Time to Digital Converter

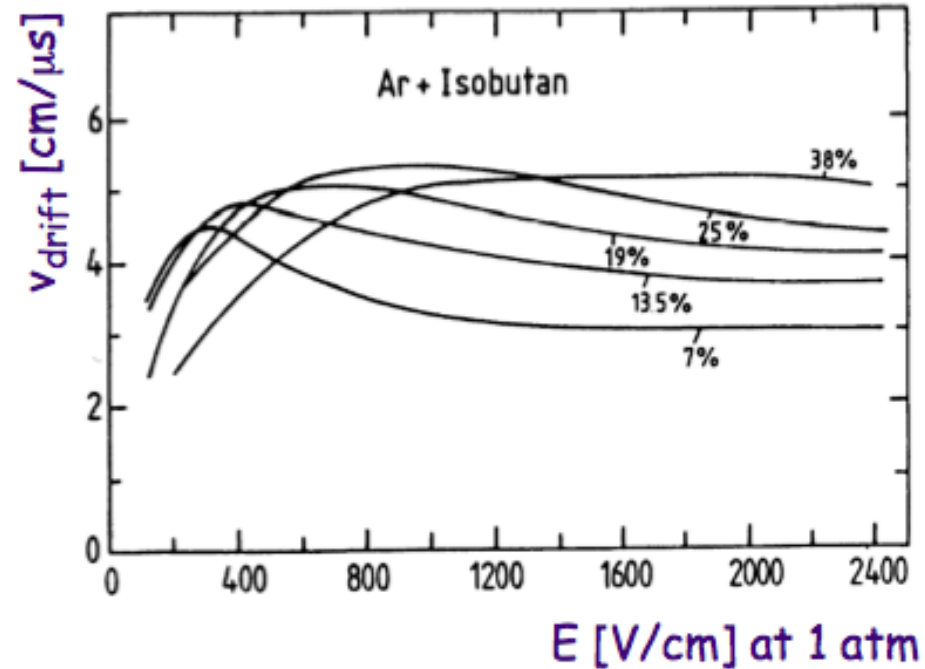
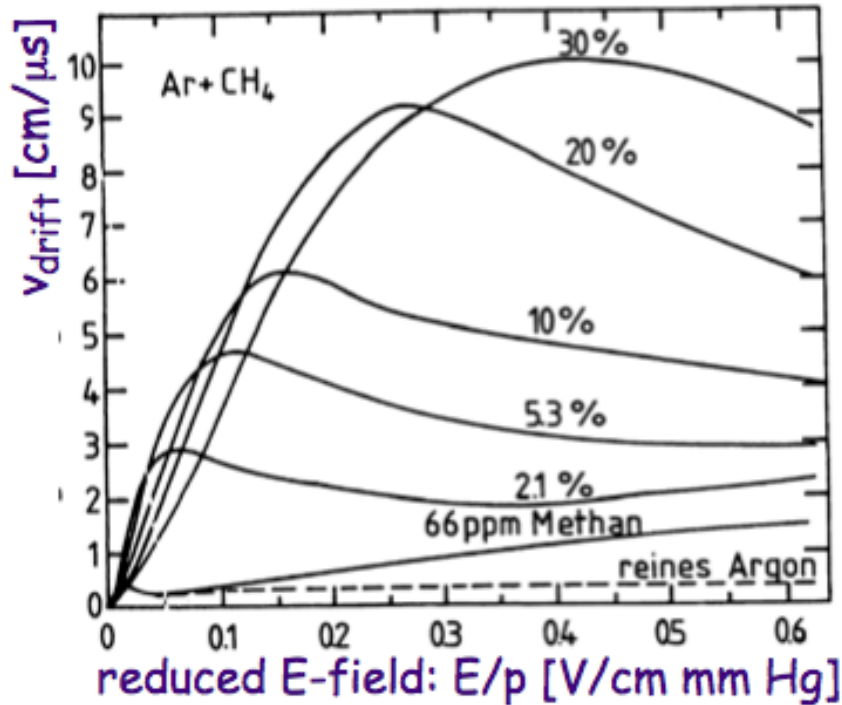
Measure arrival time t_1 of electrons at anode wire relative to reference t_0 .

- external definition of time reference t_0 (here by fast scintillator signal)

- x-coordinate given by:

$$x = \int_{t_0}^{t_1} v_D(t) dt$$

- if drift velocity v_D constant over full drift distance: $x = v_D(t_1 - t_0) = v_D \Delta t$
- advantage of drift chambers: much **larger sensitive volume** per read out channel



- strong dependence on the choice of the gas mixture
- details of the energy dependence of the ionisation cross section (Ramsauer minimum) result in a characteristic maximum of the E field dependence.
- for stable operation it is useful to operate in the maximum: $\frac{dv_{drift}}{dE} = 0$
- typical drift velocities : $v_{drift} \approx 2-10 \text{ cm}/\mu\text{s} = 20-100 \mu\text{m}/\text{ns}$