

Particle Detectors

Lecture 14

27/04/17

a.a. 2016-2017

Emanuele Fiandrini

With these tools, we can now make :

Multiwire Proportional Chambers

Drift Chambers

Time Projection Chambers

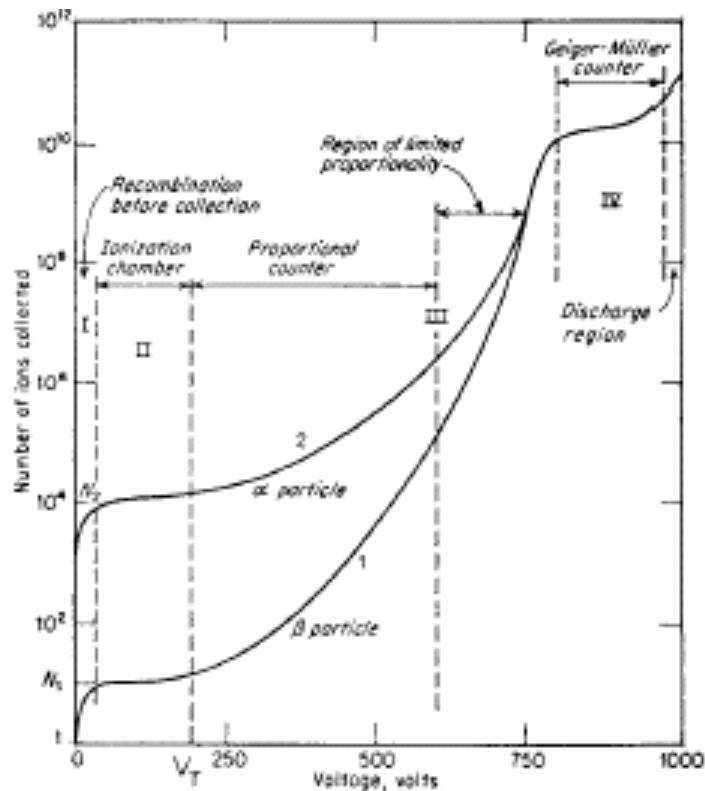
Thin Gap Chambers

Jet Chambers

Straw Tube

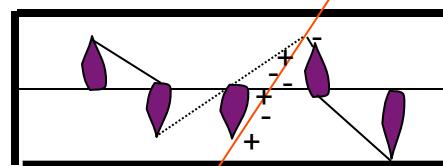
etc

Contatori Geiger



Abbiamo visto le camere ad ionizzazione ed il contatore proporzionale.

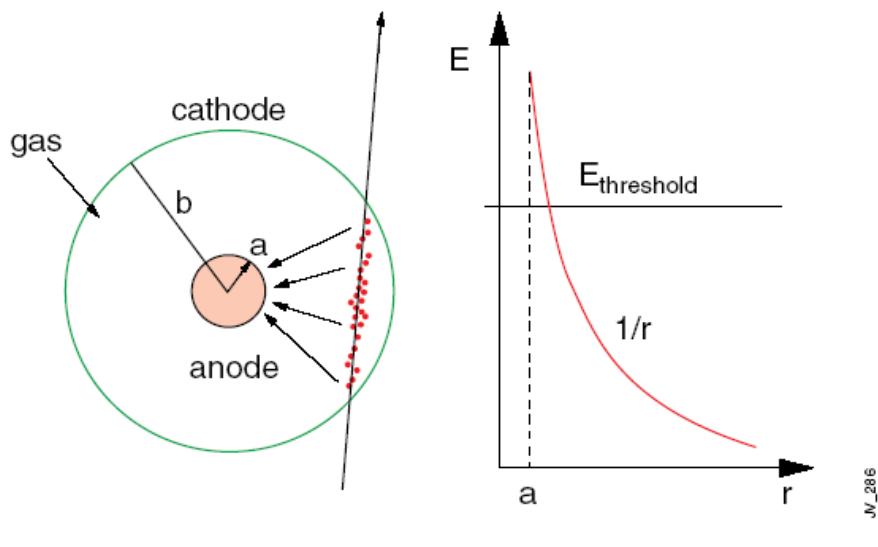
Se aumentiamo il campo elettrico in un contatore proporzionale abbiamo una copiosa produzione di fotoni durante la formazione della valanga → produzione di valanghe secondarie e la scarica si propaga su tutto il filo anodico. **Guadagni fino a 10^{10}** .



Si perde la proporzionalità fra il segnale e la ionizzazione primaria. Gli elettronini vengono rapidamente assorbiti dall'anodo mentre gli ioni si muovono lentamente verso il catodo, dove con una certa probabilità possono creare nuovi elettronini ed altre valanghe → bisogna interrompere la scarica → **L' anodo viene alimentato tramite un'altissima resistenza R in modo che il voltaggio dell'anodo U_0-IR è sotto soglia per innestare il modo Geiger. (quenching tramite resistenza).**

La R deve essere scelta in modo che la costante di tempo RC sia tale da mantenere il voltaggio sotto soglia per il Geiger per tutto il tempo che gli ioni impiegano ad arrivare al catodo → millisecondi → basso rate. Altro modo aggiungere metano, isobutano etc che assorbono i fotoni ultravioletti → scarica solo vicino all'anodo.

Geiger counter: coaxial geometry

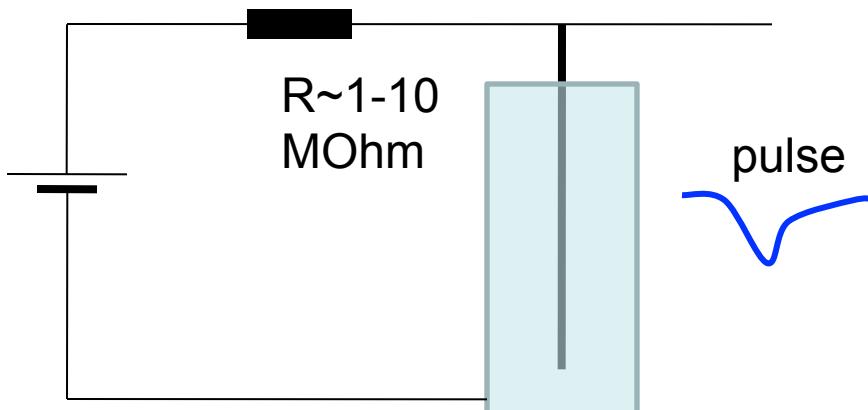


Electrons liberated by ionization drift towards the anode wire.

Electrical field close to the wire (typical wire \varnothing \sim few tens of μm) is sufficiently high for **Geiger mode** discharge.

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad C - \text{capacitance/unit length}$$

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



Discharge is quenched by the current-limiting resistor

Geiger counter: coaxial geometry



Contatori Streamer

Nei contatori Geiger abbiamo approssimativamente 90% Argon e 10% Isobutano (quenching). I fili anodici hanno un diametro di circa 30 μm e l'anodo è ad una tensione di circa 1 KV.

Se aumentiamo la proporzione del gas di quenching possiamo eliminare la propagazione della scarica lungo tutto l'anodo, ma avere solo una piccola zona del filo interessata come nel tubo proporzionale, pur mantenendo un alto guadagno (10^{10}). → regime streamer (tubi di larocci).

I tubi di larocci funzionano con fili “spessi” (50÷100 μm) e con misture di gas $\leq 60\%$ Argon e $\geq 40\%$ Isobutano ed alta tensione del filo anodico (~5KV).

In queste condizioni si passa direttamente dal regime proporzionale (o proporzionale limitato) al regime streamer senza avere il modo di funzionamento di tipo Geiger.

Anche in questo caso si perde la proporzionalità con la ionizzazione primaria

Contatori proporzionali

Scelta del gas.

I fattori che determinano la scelta del gas sono:

- i. relativamente bassa d.d.p fra gli elettrodi
- ii. alto guadagno
- iii. alta ionizzazione specifica
- iv. risolvere alto rate
- v. basso costo

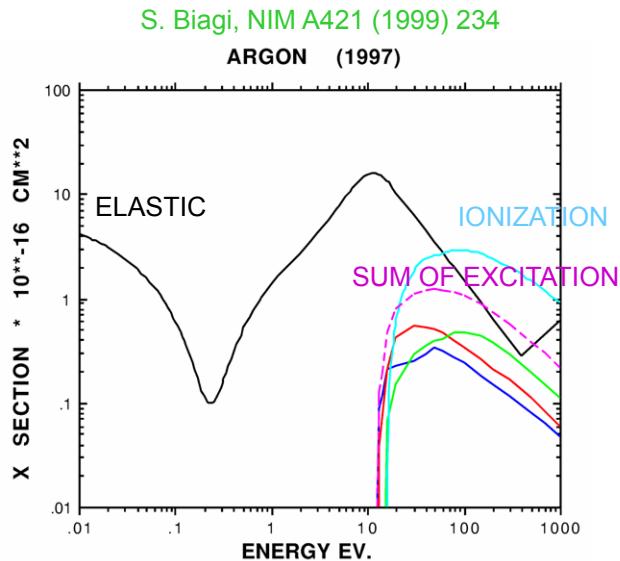
Choice of Fill Gas

- Avalanche multiplication occurs in all gases but there are specific properties required from a “magic” gas mixture
 - Low working voltage (low ionization potential)
 - Stable operation at high gain
 - High rate capability (fast recovery)
 - Good proportionality
- **Noble gases** are usually the principal components of a useful gas
 - No molecules to absorb energy in inelastic collisions
- **Argon** gives more primary ionization than Helium or Neon
 - Kr and Xe are better and have been used but they are expensive
- However a chamber full of argon does not produce stable operation and suffers breakdown at low gain:
 - High excitation energy for noble gases (11.6eV for Ar) means that UV photons emitted from atoms excited in the avalanche process have enough energy to eject photoelectrons from the cathode material
 - Photoelectrons initiate further avalanches.
 - Process becomes self-sustaining → continuous discharge.

SWPC – Choice of Gas

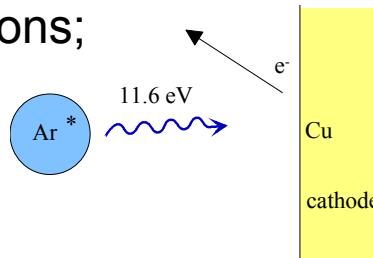
In the avalanche process molecules of the gas can be brought to excited states.

Solution: addition of polyatomic gas as a quencher



De-excitation of noble gases only via emission of photons; e.g. 11.6 eV for Ar.

This is above ionization threshold of metals; e.g. Cu 7.7 eV.

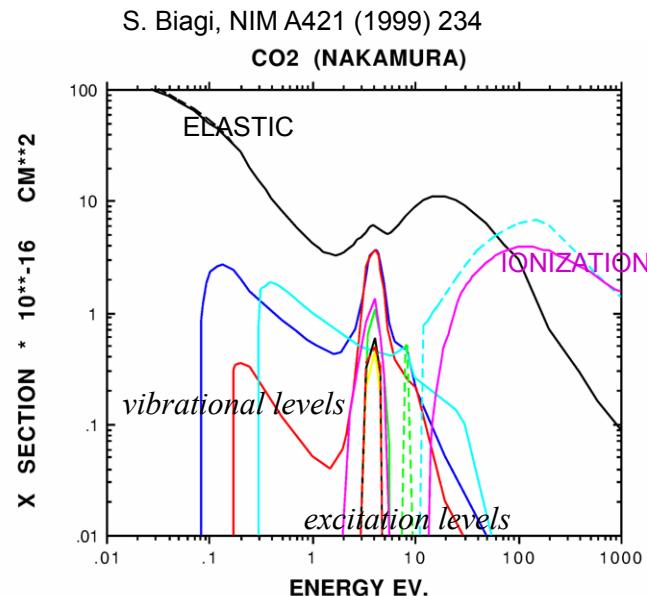


new avalanches \rightarrow permanent discharges

→ per guadagni al di sopra di $10^3 \div 10^4$ scarica

Absorption of photons in a large energy range (many vibrational and rotational energy levels).

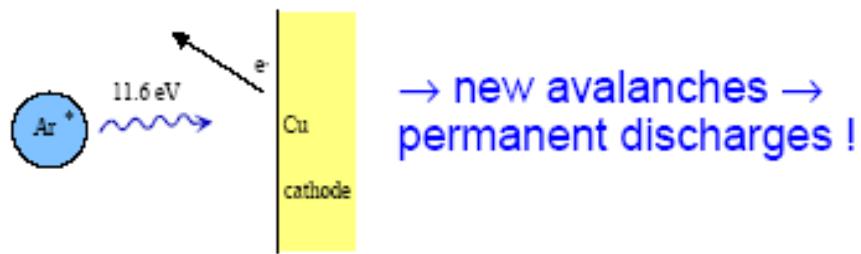
Energy dissipation by collisions or dissociation into smaller molecules.



Contatori proporzionali

La dis-eccitazione dei gas nobili è possibile solo emettendo fotoni (e.g. 11.6 eV per l'argon).

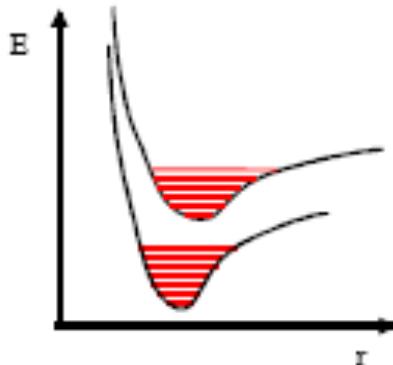
Questa energia è sopra soglia per la ionizzazione dei metalli (e.g. Cu 7.7 eV).



Soluzione : si aggiungono dei gas poliatomici (CH_4 , C_4H_{10} , etano, alcol ...), oppure CO_2 , BF_3 .

Queste molecole funzionano da moderatori (quenchers) in quanto assorbono i fotoni irraggiati dissipando l'energia dissociandosi o con collisioni elastiche

Contatori proporzionali



I moderatori possono assorbire fotoni in un ampio range di energie, in quanto hanno molti livelli rotazionali e vibrazionali. Ad esempio il metano ha una banda di assorbimento $7.9 \div 11.5$ eV.

→ **gas usato miscuglio 90% Ar 10% CH_4**

70% Ar 30% C_4H_{10}

→ **guadagni fino a 10^6**

L'uso di moderatori organici comporta problemi di invecchiamento. Infatti la ricombinazione o dissociazione di molecole organiche comporta la formazione di polimeri solidi o liquidi che si accumulano sull'anodo e sul catodo.

Quando il flusso di radiazione è molto alto la velocità di produzione di ioni è maggiore di quella di assorbimento nel catodo → formazione di carica spaziale → scarica continua.

Soluzione: pulizia completa della camera o/e aggiunta di piccole quantità di gas non polimerizzante (methylal o alcol propilico). Questi alcol cambiano gli ioni molecolari al catodo in una specie non polimera attraverso un meccanismo di scambio di ioni.

Camere proporzionali (MWPC)

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

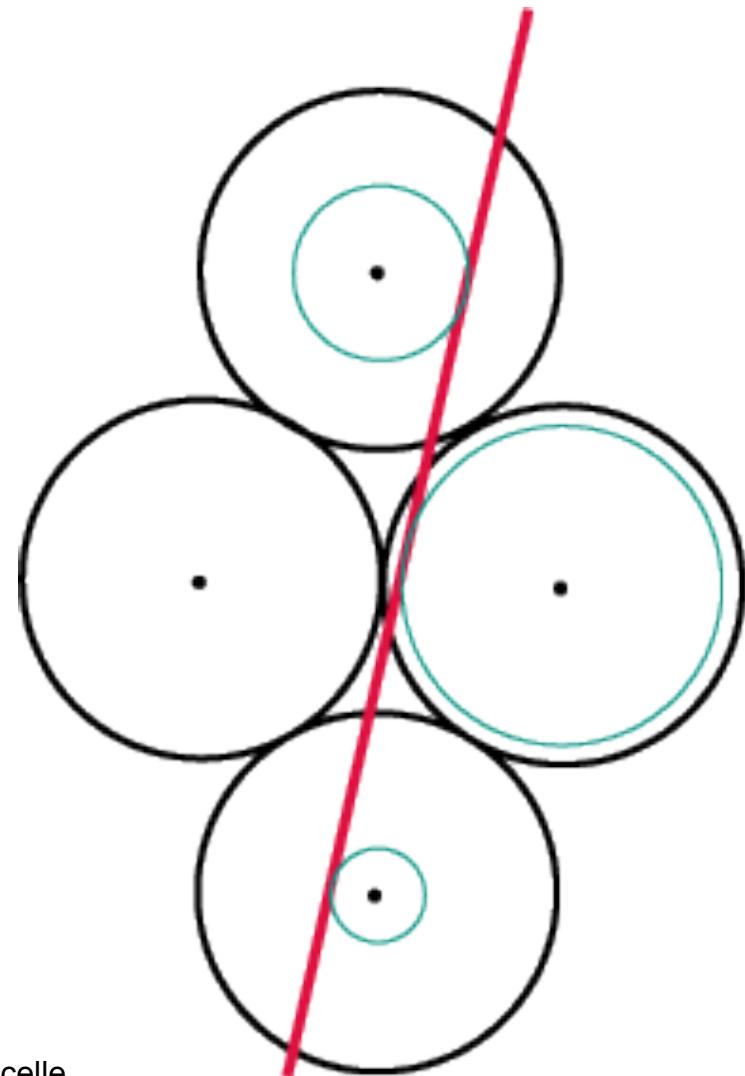
Il tubo proporzionale (o anche il tubo di Iarocci) può fornire una qualche informazione sulla posizione della particella, ma certamente limitata.

→ 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.

Precision Tracking

- In una camera proporzionale la risoluzione spaziale e' limitata dalla dimensione della camera, $\sigma = d/\sqrt{12}$
- 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)



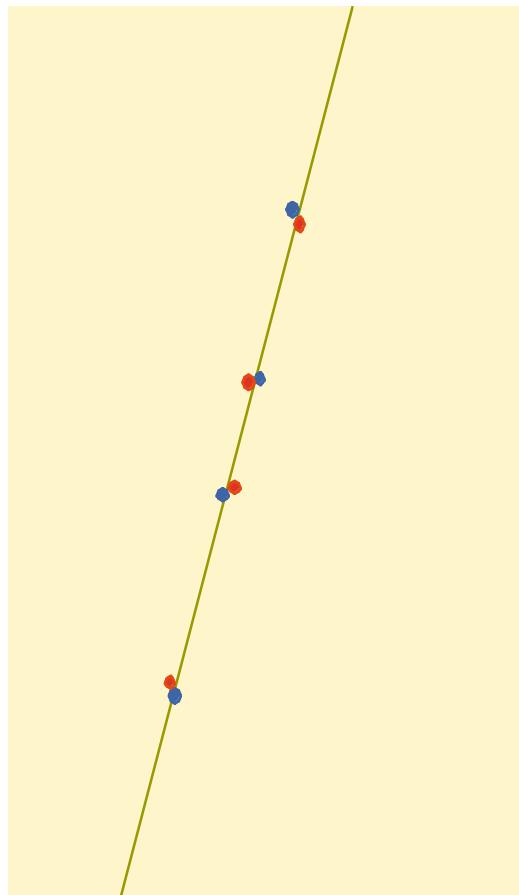
Rivelatori di particelle

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

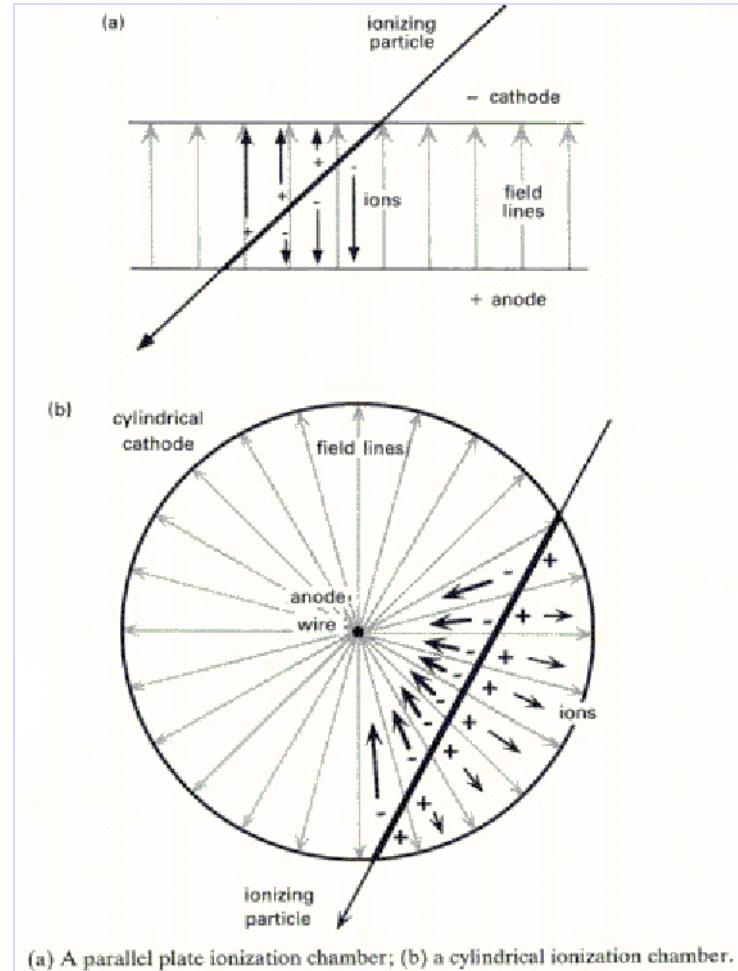
GAS (STP)	Spessore	ε (%)
Elio	1 mm	45
	2 mm	70
Argon	1 mm	91.8
	2 mm	99.3

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.

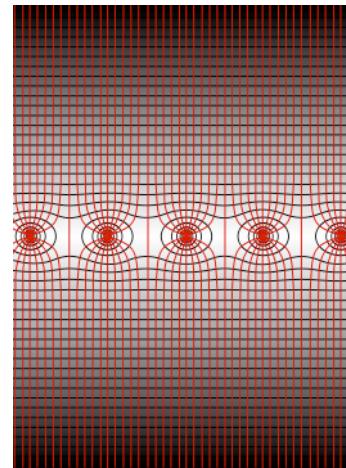
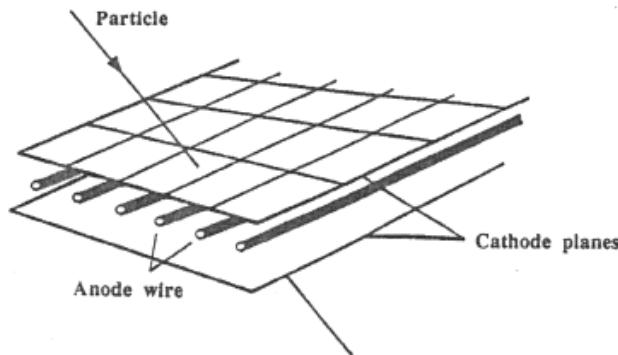


(a) A parallel plate ionization chamber; (b) a cylindrical ionization chamber.

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

Multiwire Proportional Chambers (MWPC)

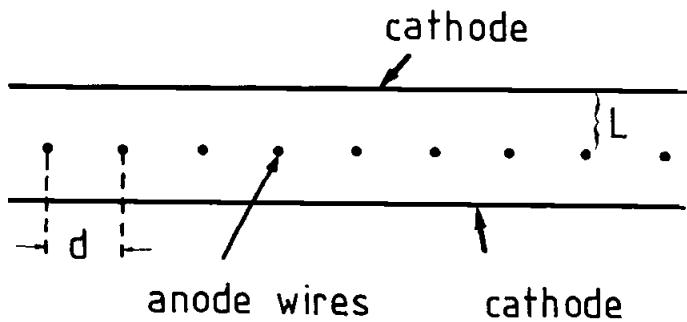
- An array of many closely spaced anode wires in the same chamber can act as independent proportional counters



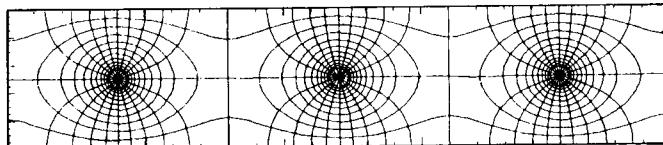
- Plane of equally spaced anode wires between two cathode planes
 - Typical wire spacing 2mm, typical cathode gap width 7-8mm
 - invented by Charpak in 1968 –Nobel prize in 1992

Camere proporzionali (MWPC)

La configurazione base di una camera proporzionale è:



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

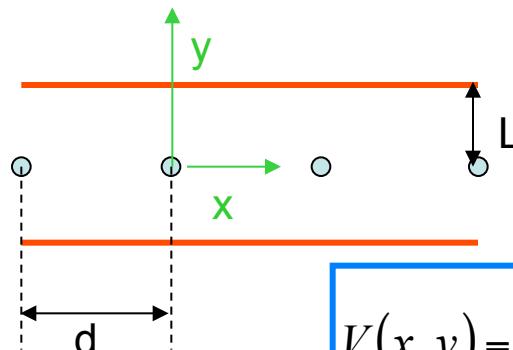


field lines and equipotentials around anode wires

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:

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

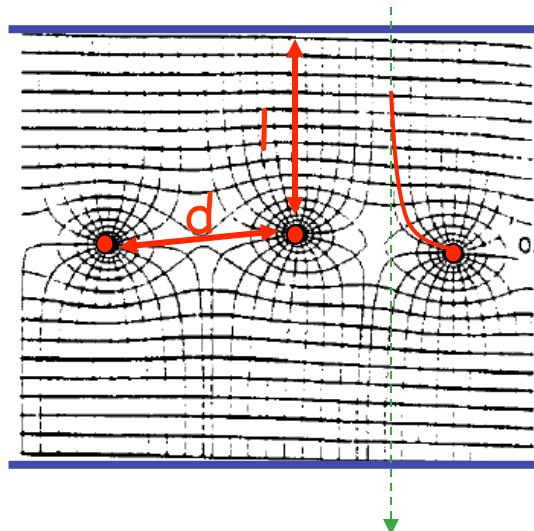
$$E(x, y) = \frac{CV_0}{2\epsilon d} \left(1 + \tan^2 \frac{\pi x}{d} \tanh^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{1/2} \cdot \left(\tan^2 \frac{\pi x}{d} + \tanh^2 \frac{\pi y}{d} \right)^{-1/2}$$

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

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 e' praticamente uniforme:

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

e fa derivare gli elettroni.

In prossimita' dei fili il campo e' 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 μm dal filo si innesca un processo di moltiplicazione a valanga:

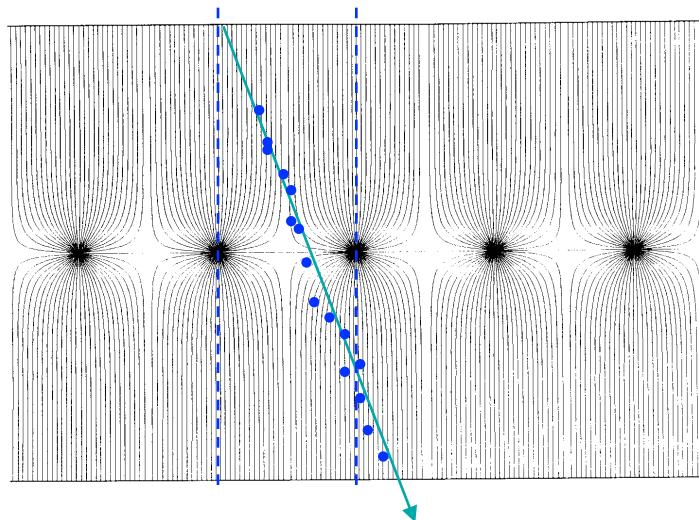
- ✓ Gli elettroni sono raccolti sul filo;
- ✓ Gli ioni iniziano a migrare verso i catodi.

Camere proporzionali (MWPC)

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

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

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



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

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

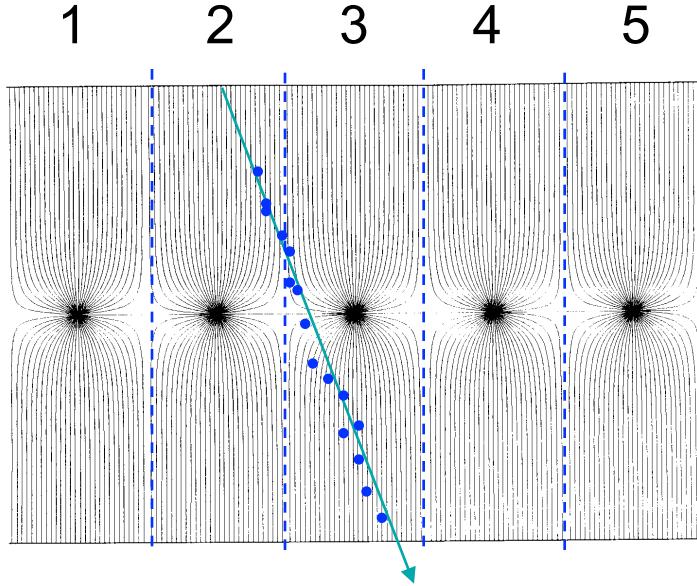
per $y \ll d$ $E(x, y) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r}$ $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$

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:

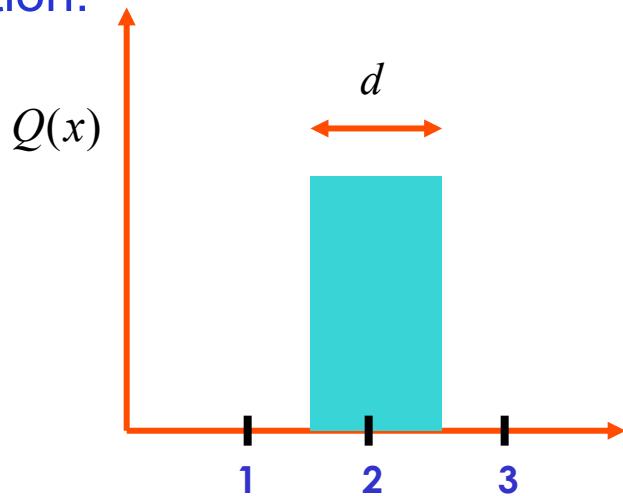
$$\sigma = d/(12)^{1/2}$$

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

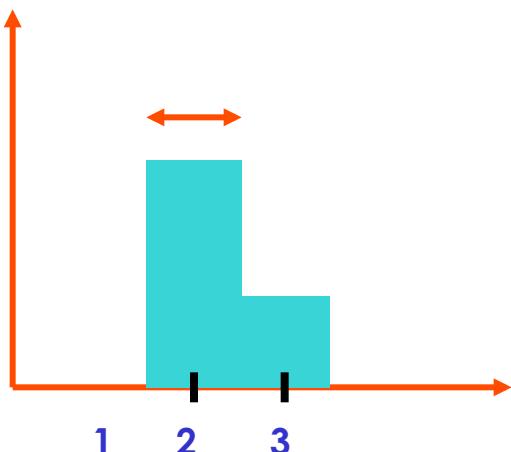
Charge on a single wire/strip is the worst possible situation for the resolution:



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

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

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:

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

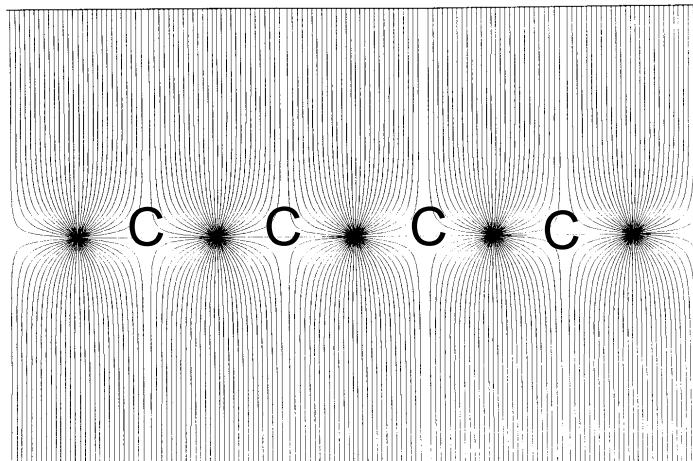
dove E_i è il campo creato mettendo l'elettrodo i alla tensione V_i ed a massa tutti gli altri in assenza della carica q .

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.

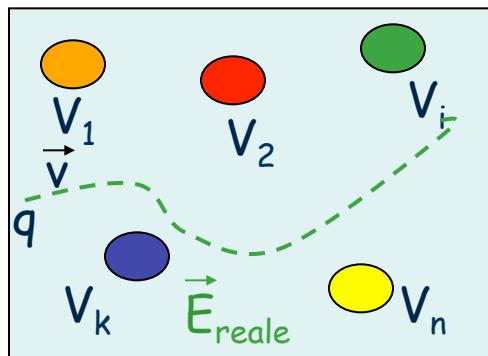
Ci si attende quindi che il segnale (negativo) dovuto al moto degli ioni sia diffuso su tutti gli anodi vicini a quello interessato → sembra impossibile una misura di posizione. Ma Teorema di Ramo



Induzione del segnale: teorema di Ramo

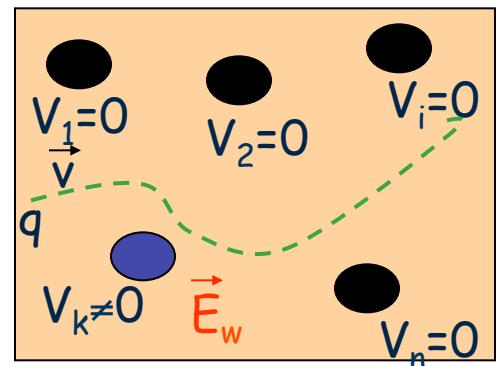
Le cariche in moto nel gas inducono una corrente sugli elettrodi che rappresenta il segnale del passaggio della particella.

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:

$$\begin{aligned} V_{i \neq k} &= 0 \\ V_k &\neq 0 \quad (=1 \text{ V}) \end{aligned}$$

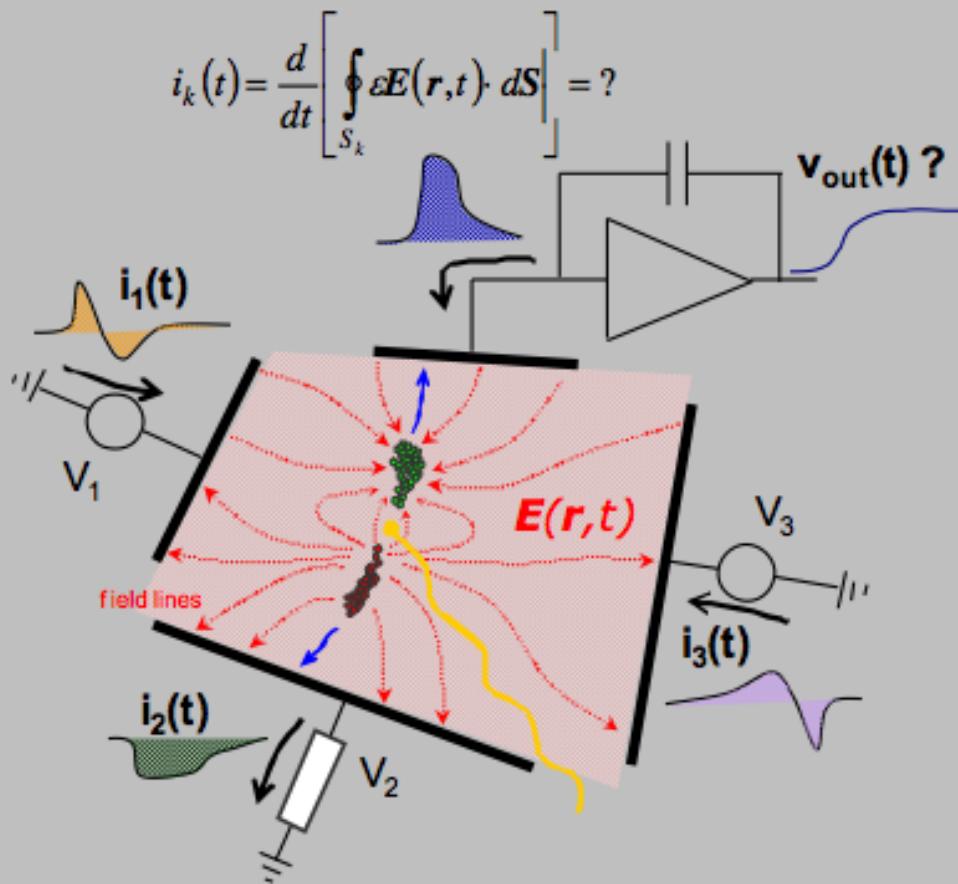


Il teorema di Ramo afferma che la **corrente indotta dalla carica q sull'elettrodo k e'**:

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

Rivelatori di Particelle

The problem of signal formation



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

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!!!)

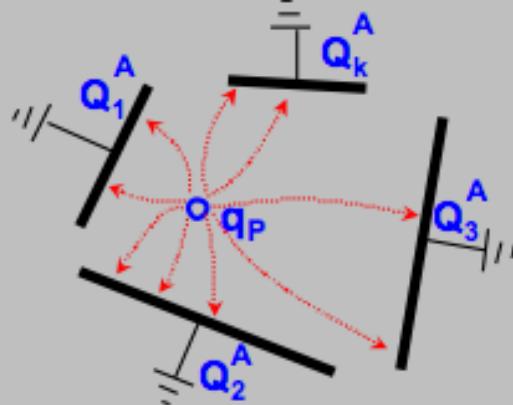
- requires to compute the total field $E(x,y,z,t)$ (due to bias voltages, fixed space charge and moving charges) at every time instant, the integral of the flux on the electrode surface, etc.

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'

Ramo's Theorem - I

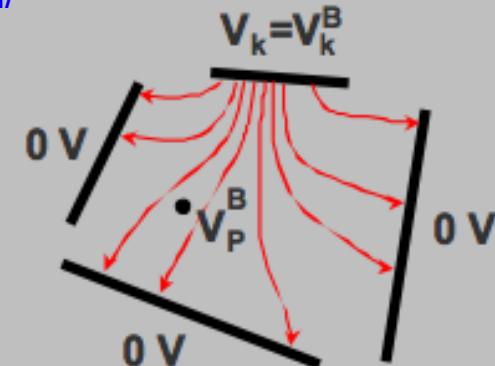
✓ Green's reciprocity theorem



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:

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

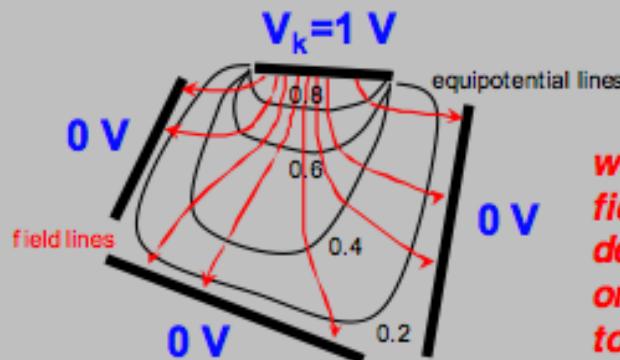
$$i_k(t) = q_P \tilde{E}_w \cdot v(x(t), y(t), z(t))$$

weighting field:

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

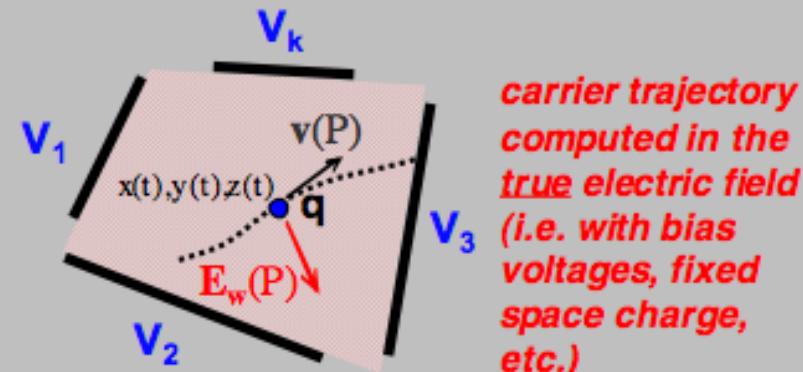
true carrier velocity:

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



($V_k = 1 \text{ V}$, all others grounded)

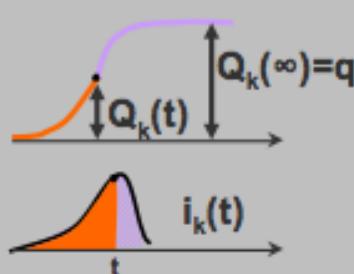
weighting field/potential depends only on device topology (Laplace eq.)



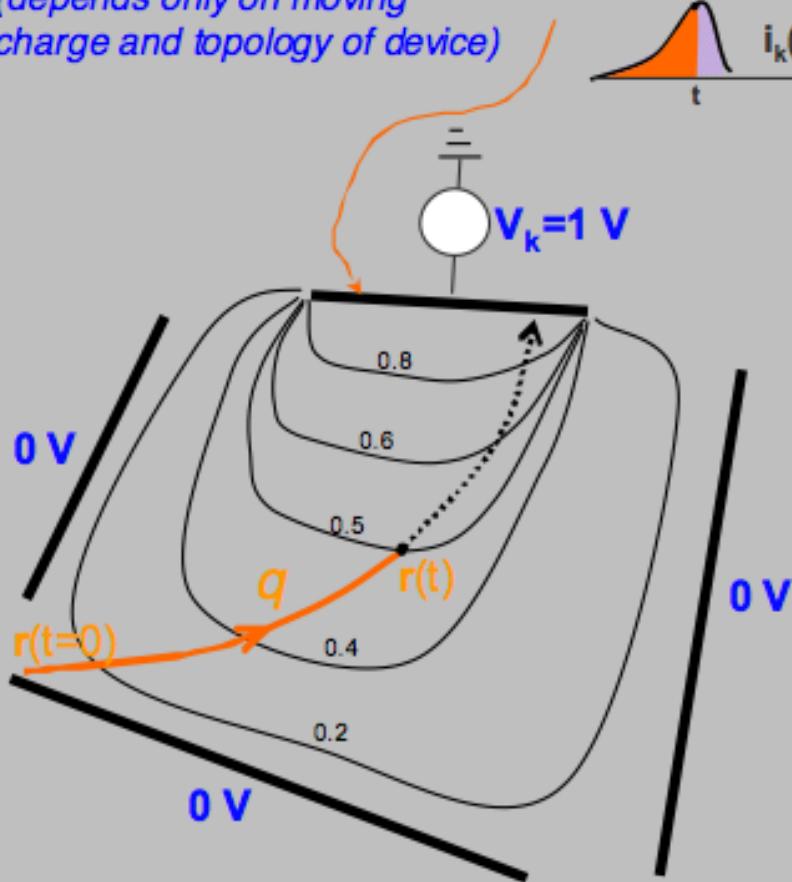
carrier trajectory computed in the true electric field (i.e. with bias voltages, fixed space charge, etc.)

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

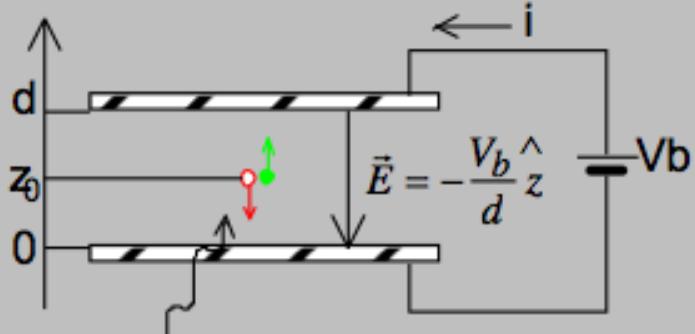
Generalizations

- 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

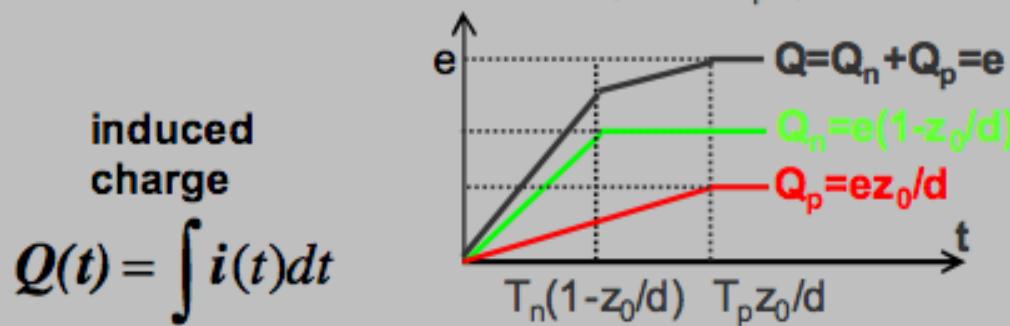
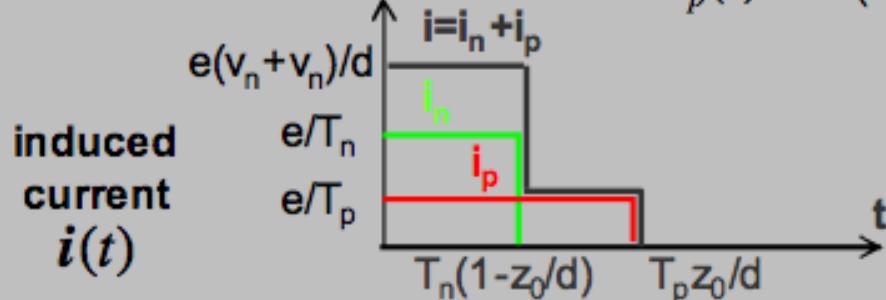
Single e-h pair



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

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

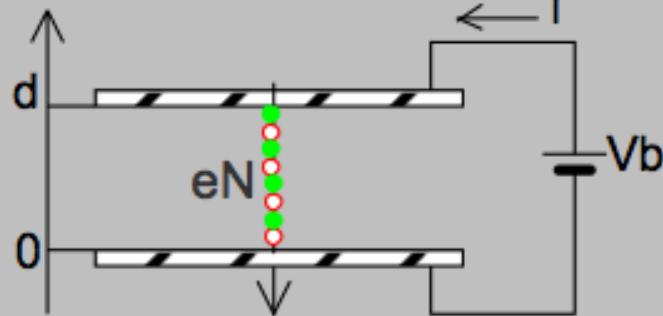
$$i_p(t) = +e(E_w v_p) = e \frac{v_p}{d} = e \frac{1}{T_p} \quad 0 \leq t \leq T_p \frac{z_0}{d}$$



Signal Formation and Ramo's theorem - III

✓ Induced current (charge) in planar electrode geometry

Continuous ionization



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

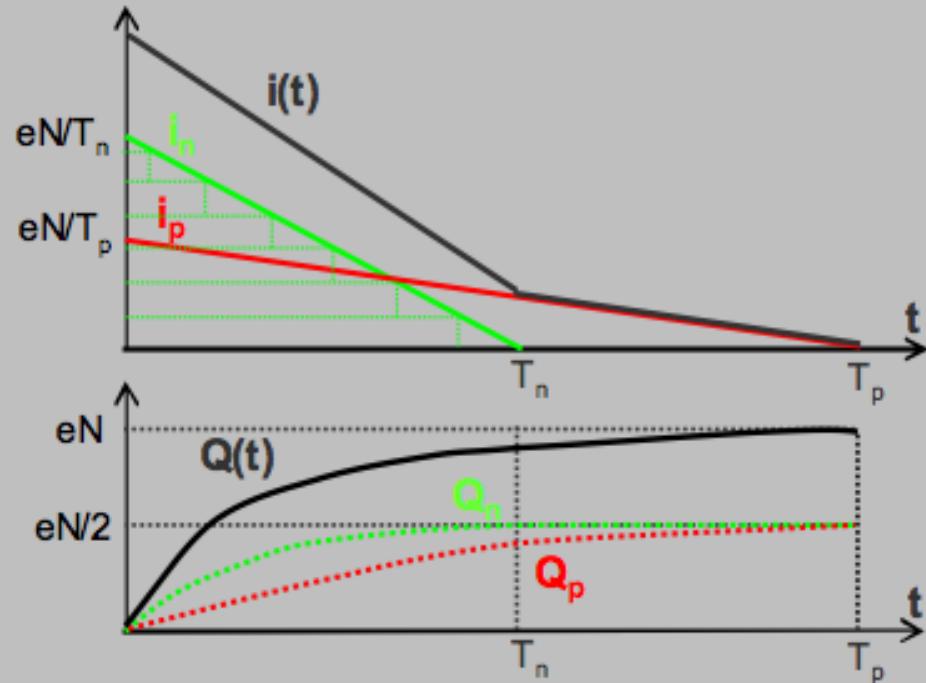
induced current

induced charge

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

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

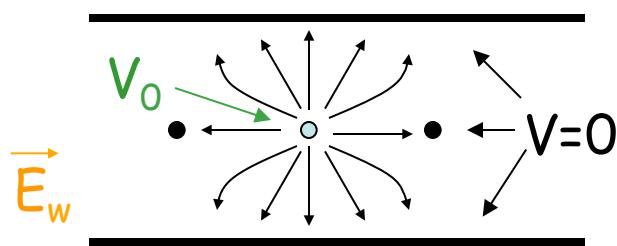
$$i_p(t) = eN \frac{v_p}{d} (1 - t/T_p) = \frac{eN}{T_p} (1 - t/T_p) \quad 0 \leq t \leq T_p$$



Forma del segnale

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



$$E = \frac{\lambda V_0}{2\pi\epsilon_0 r} \frac{1}{r}$$

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

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

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

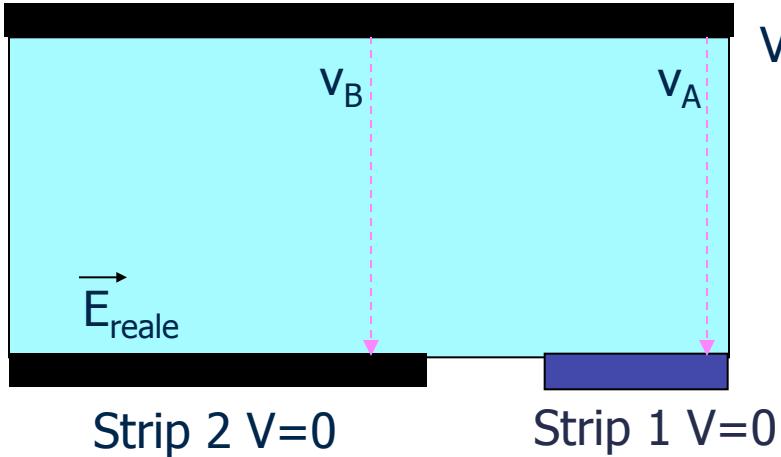
$$I = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{t_0 + t}$$

NB: $V_0 = 1$ 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**.

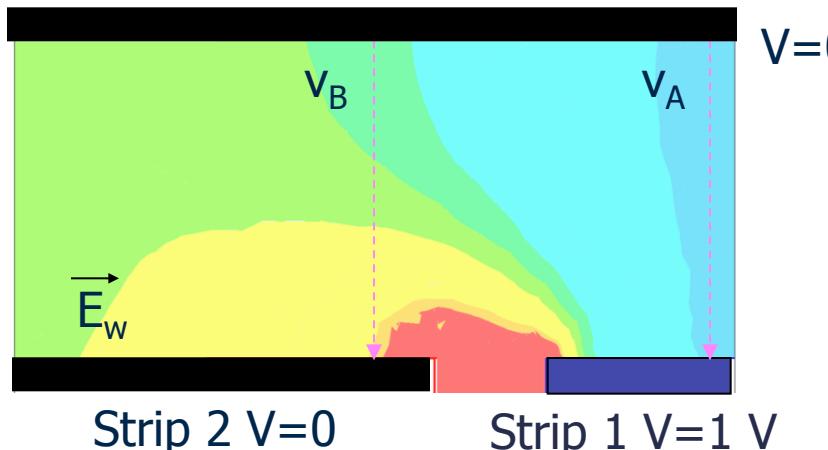
Esempio: carica in moto in un rivelatore piano con lettura a strip.

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



$$V = -V_0$$

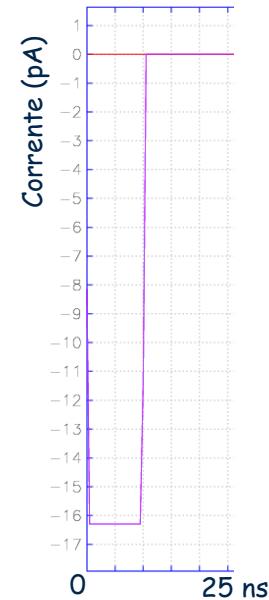
Introduciamo il “weighting field”



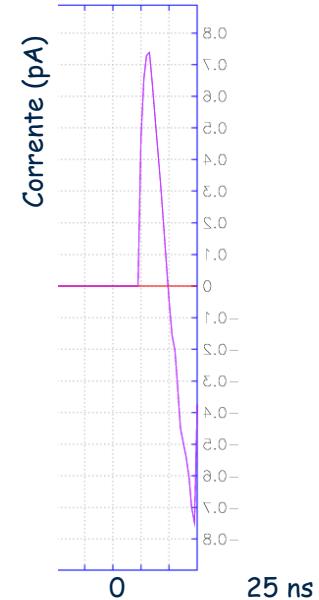
$$V = 0$$

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

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



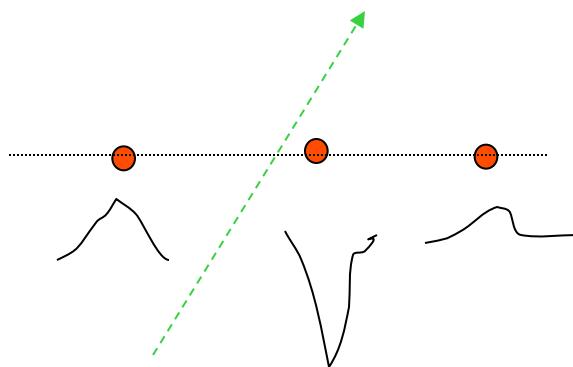
Segnale indotto sulla strip 1 nel **caso A**



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 \rightarrow il segnale sugli anodi vicini è **positivo** e, in gran parte, compensa il segnale **negativo** dovuto all'accoppiamento capacitivo.

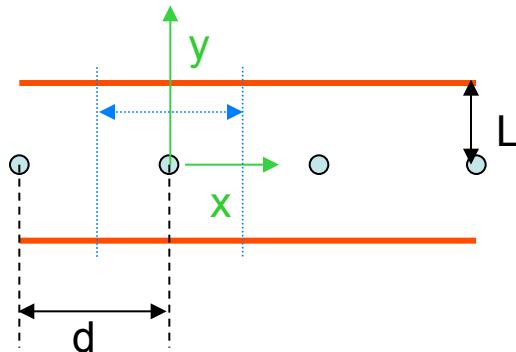


Il segnale sugli anodi vicini è piccolo e di segno opposto

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

$$M \approx k e^{CV_0}$$

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) \rightarrow rischio di cattivo funzionamento al di sopra di un certo valore.

Camere proporzionali (MWPC)

L (mm)	2a (μ m)	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

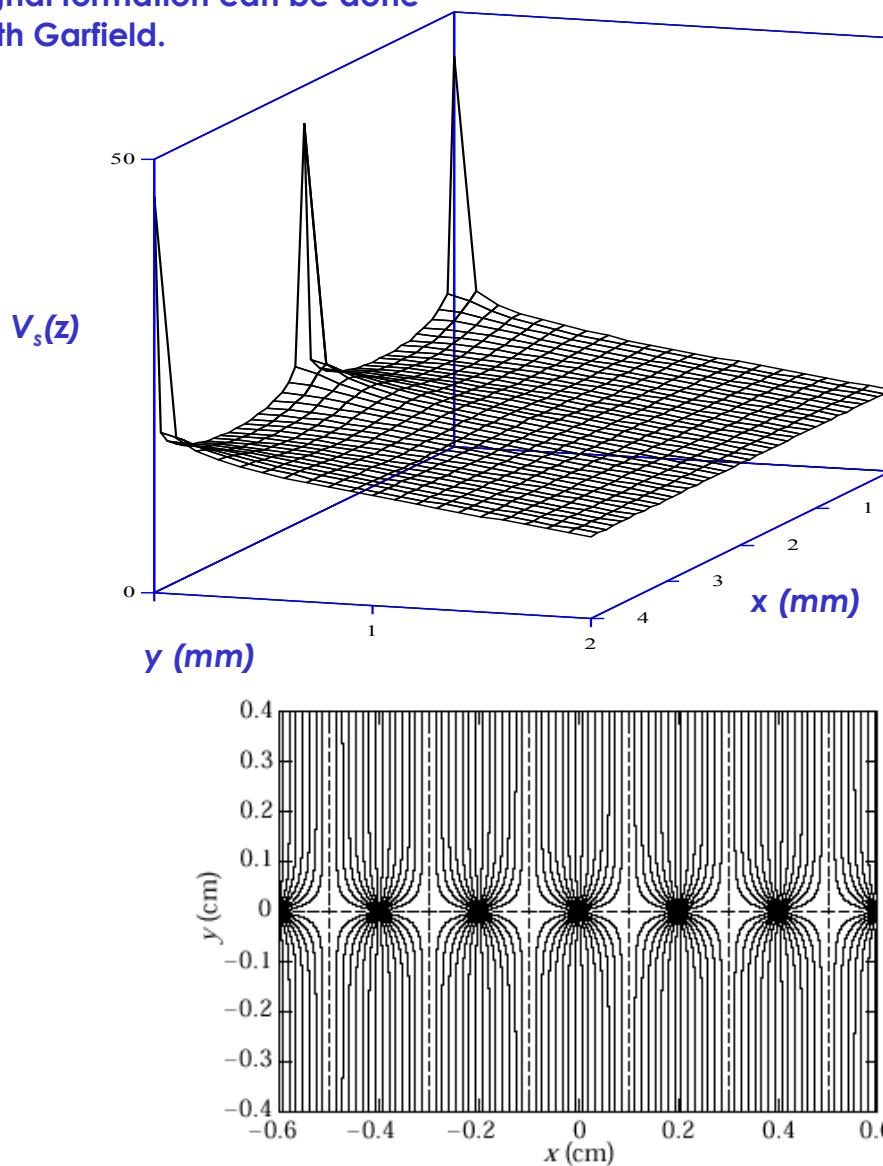
Capacità per unità di lunghezza (pF/m) per diverse geometrie di camere proporzionali piane.

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

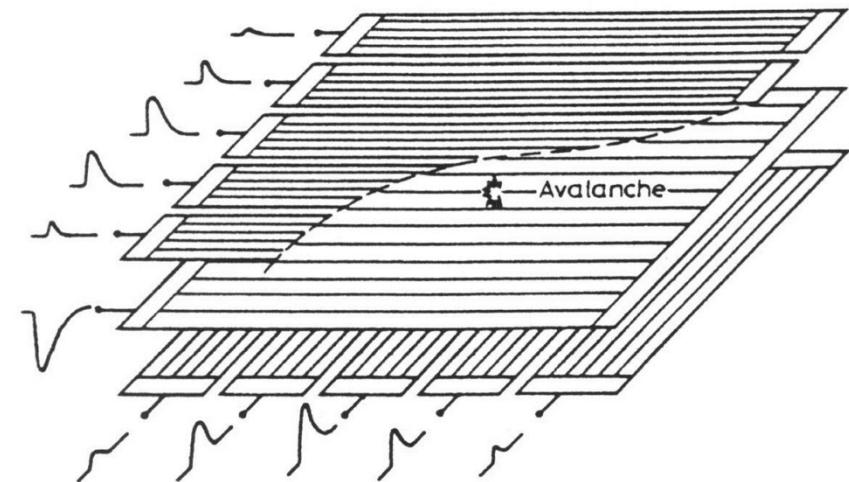
Advanced calculations of electric field, drift, diffusion and signal formation can be done with Garfield.



Two dimensional readout can be obtained by; crossed wires, charge division with resistive wires, measurement of timing differences or segmented cathode planes with analogue readout

Resolution given by (binary readout) : $\sigma = d / \sqrt{12}$

Analogue readout and charge sharing can improve this significantly when the left/right signal size provide more information about the hit position.

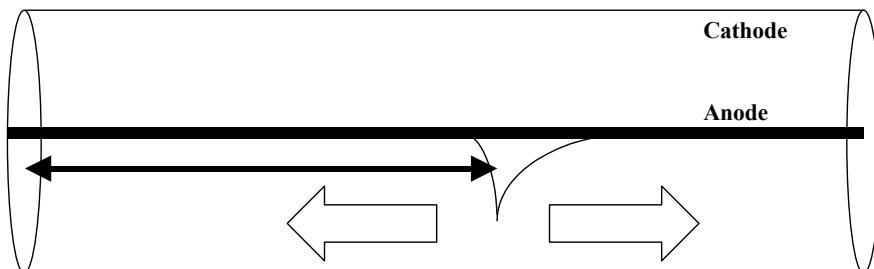


$$y = \frac{\sum (Q_i - b)y_i}{\sum (Q_i - b)} ,$$

Two Dimensional Readout: Use of Timing

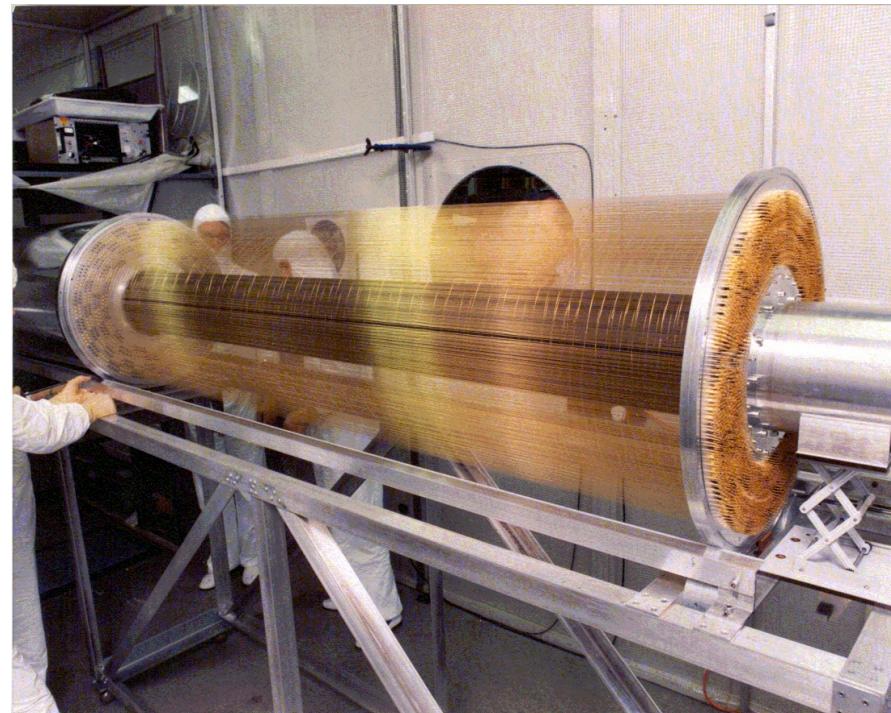
- Example: ALEPH Inner Tracking Chamber

Distance can be estimated by measuring the time difference



The speed of transmission along the wire is close to c

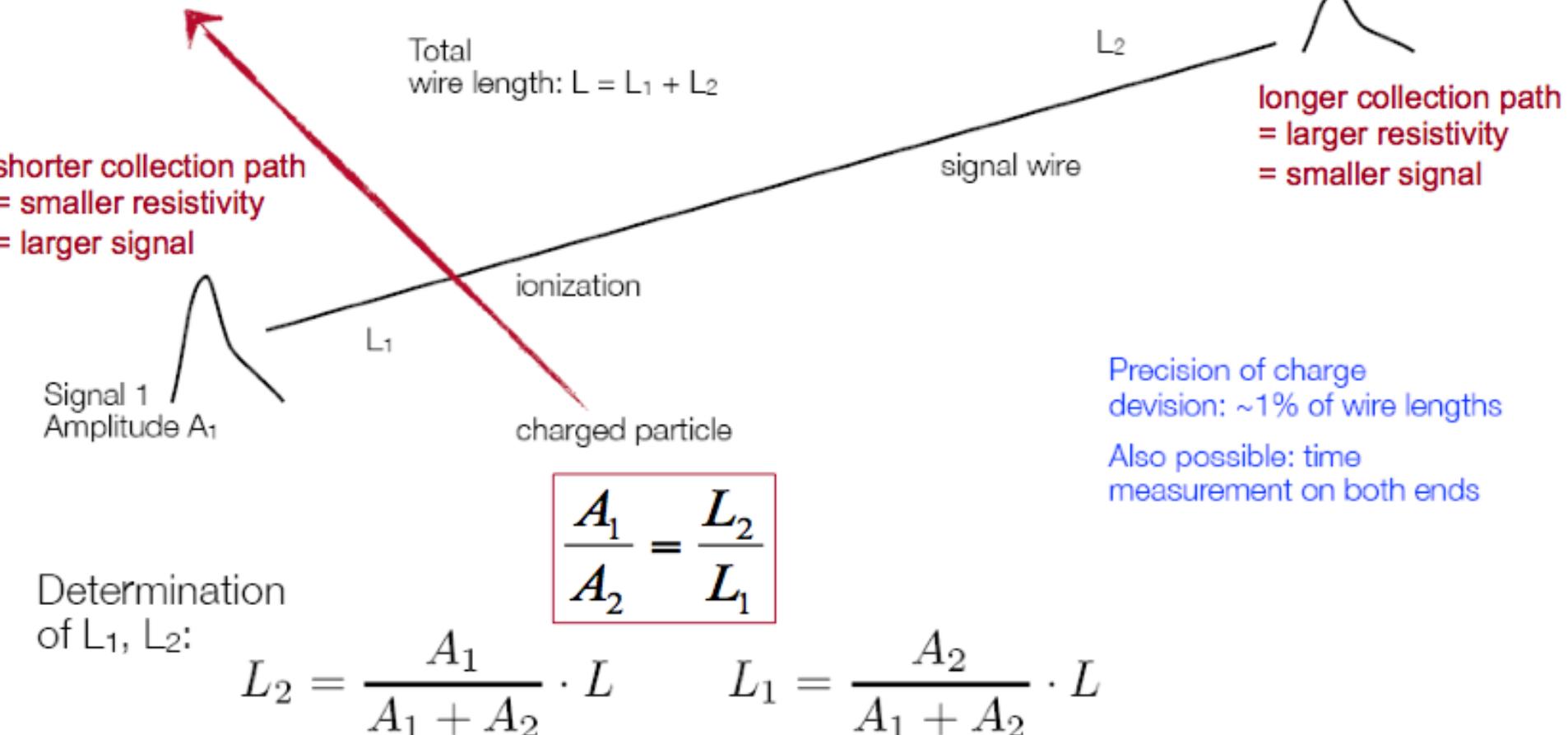
Note that $c \approx 1\text{ns}/\text{m}$, so cm precision requires 50ps timing resolution



- 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

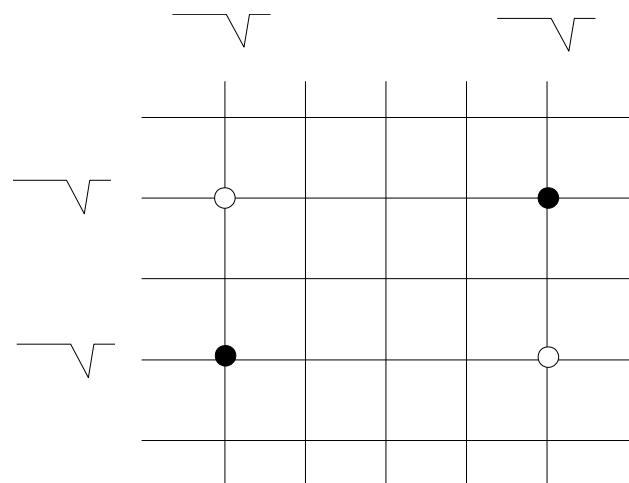


Camere proporzionali (MWPC)

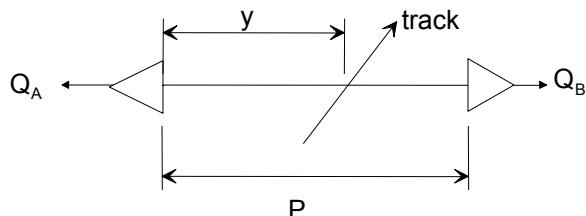
Lettura della seconda coordinata.

Più di un piano anodico, cioè due MWPC ortogonali. Segnali spuri: più 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



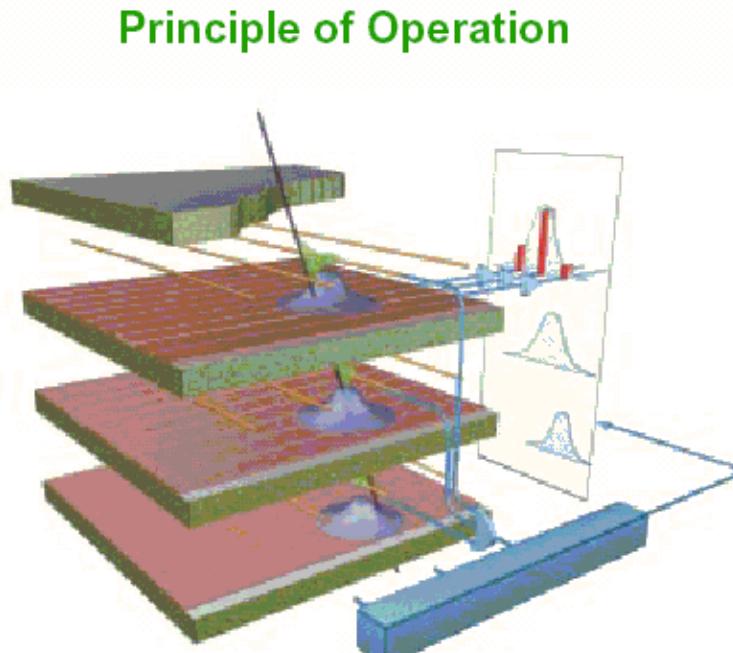
- Divisione di carica Fili resistivi (Carbon, $2k\Omega/m$).



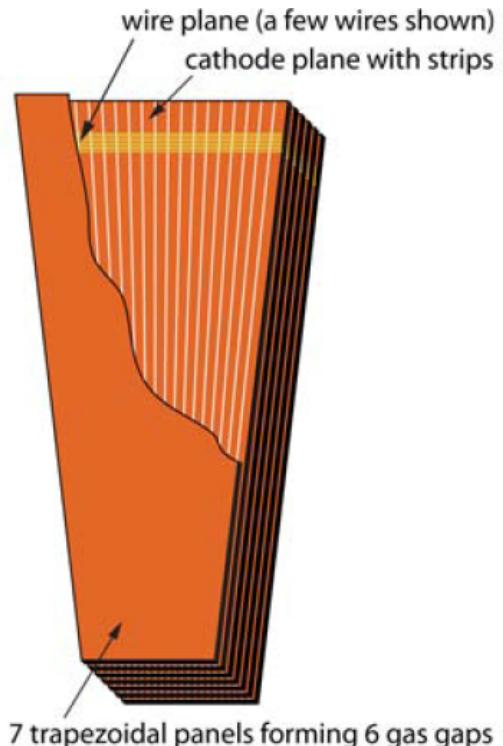
$$\frac{y}{P} = \frac{Q_B}{Q_A + Q_B} \quad \sigma\left(\frac{y}{P}\right) \text{ up to } 0.4\%$$

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)



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 è:

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

Tipicamente è 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.

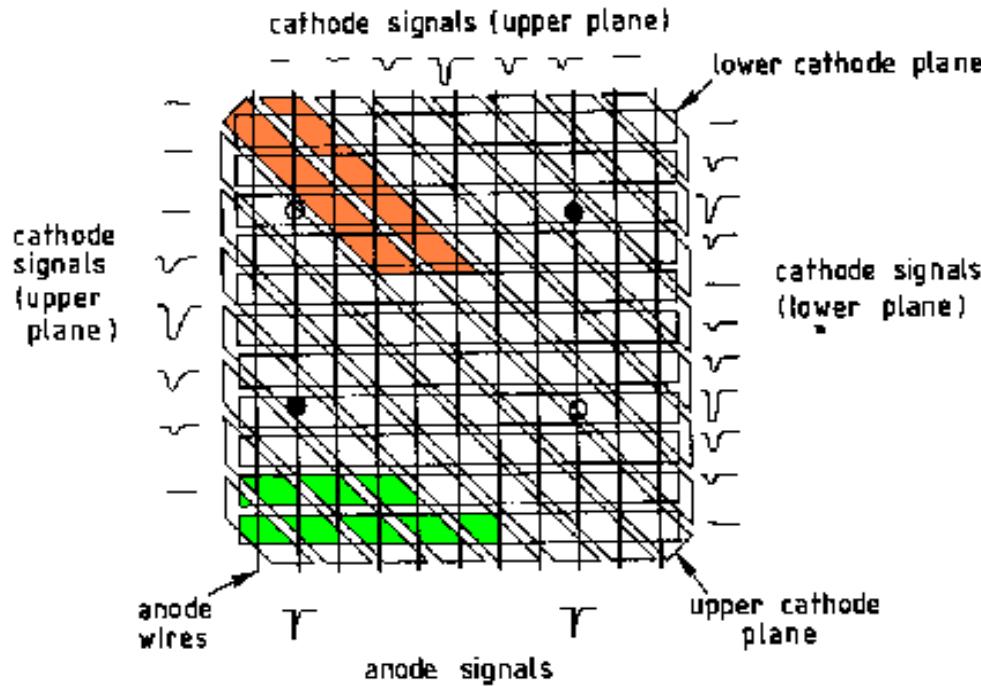
$$y = \frac{\sum q_i y_i}{\sum q_i}$$

Tipicamente è dell'ordine delle centinaia di micron

Camere proporzionali (MWPC)

- 1 piano di fili
+ 2 piani catodici
segmentati

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



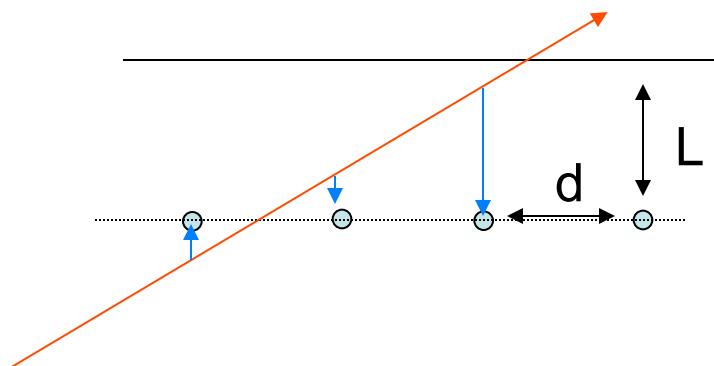
Le strip catodiche diagonali permettono di eliminare l'ambiguità degli hit. L'ambiguità ie' dovuta al fatto che il punto di passaggio P va determinato a partire dai segnali di fili indipendenti che devono essere combinati.

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).

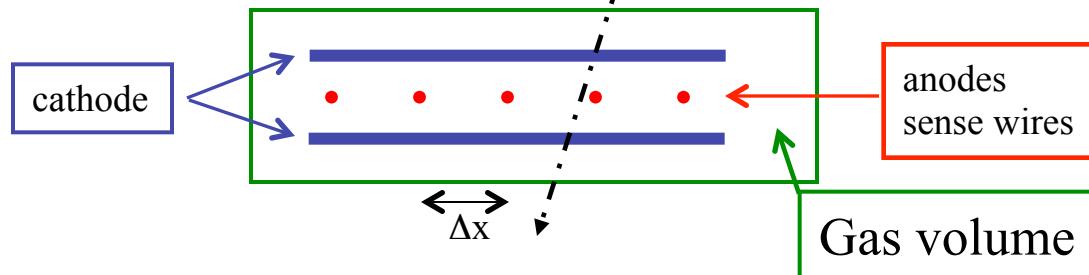
Tipicamente le camere hanno un'efficienza $\sim 99\%$, con la giusta alta tensione (in plateau) e una soglia non troppo alta.

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
- ease of construction

Disadvantages of MWPC:

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