

Contatore proporzionale cilindrico

Camere a fili, MWPC

Camere a drift

Time projection chamber, TPC

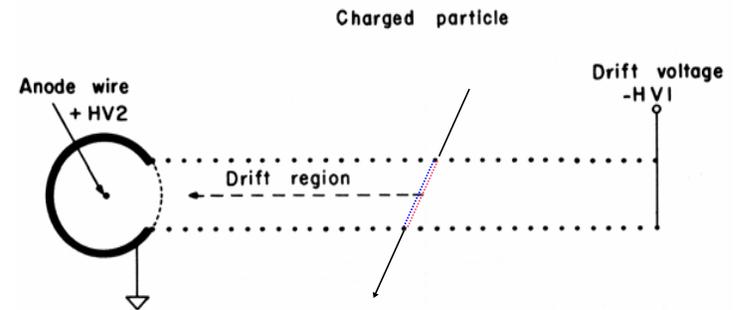
Tutti questi rivelatori si basano sull'amplificazione in un gas, in una zona di campo elettrico elevato intorno ad un filo.

In un certo intervallo di valori del campo elettrico l'amplificazione nel gas è proporzionale al campo elettrico stesso.

Tre fasi:

- Creazione delle **coppie elettrone-ione**, primarie e secondarie
- **Deriva (drift)** degli elettroni e degli ioni nel campo elettrico
- **Amplificazione** della cariche degli elettroni vicino al filo

PGI 2005 lect_2 1



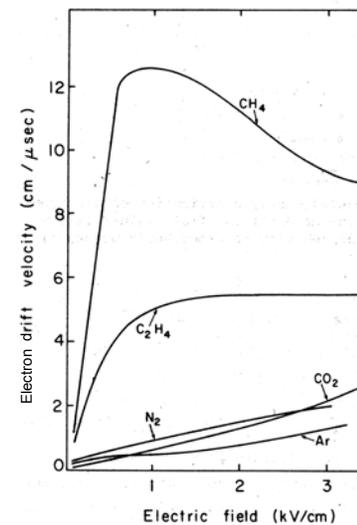
PGI 2005 lect_2 2

Coppie elettrone-ione

La tabella indica il numero di coppie elettrone-ione primarie prodotte in un cm di gas a pressione atmosferica. Alcune di queste particelle producono immediatamente ionizzazione secondaria.

Gas	coppie primarie	coppie primarie e secondarie
Ar	24.9	94
Ne	12	39
CO ₂	34	91
CH ₄	16	53

PGI 2005 lect_2 3



Drift

La velocità di *drift* degli elettroni dipende dal gas nel quale derivano e dal campo elettrico applicato.

Può essere molto sensibile alle proporzioni dei gas componenti e alla temperatura.

In alcuni gas presenta saturazione a campi elettrici elevati.

PGI 2005 lect_2 4

La velocità di *drift* degli ioni positivi u^+ è molto più piccola di quella degli elettroni e proporzionale al campo elettrico applicato.

$$u^+ = \mu^+ E$$

La costante di proporzionalità (mobilità, μ^+) dipende dallo ione e dal gas in cui si muove come in tabella:

gas	ione	mobilità [cm ² s ⁻¹ V ⁻¹]
Ar	Ar ⁺	1.7
90% Ne - 10%CO ₂	Ne ⁺	3.9 - 4.1
Ar	CO ₂ ⁺	1.7
CO ₂	CO ₂ ⁺	1.1

In presenza di un campo magnetico si deve tener conto anche dell'**angolo di Lorentz**.

Se la velocità degli elettroni che derivano, ossia il campo elettrico \vec{E} , non è parallela al campo magnetico \vec{B}

- si ha una forza di Lorentz nella direzione $\vec{E} \times \vec{B}$
- l'elettrone si scosta dalla direzione data da \vec{E}
- in assenza di materiale (collisioni), l'elettrone spiralizza

La risoluzione ne soffre, soprattutto se il campo magnetico non è omogeneo

L'effetto dell'angolo di Lorentz è modesto nelle camere a fili (MWPC), ma può essere molto importante nelle camere a *drift* o nella *time projection chamber* (TPC), ove il percorso degli elettroni è molto lungo

Amplificazione nel gas intorno al filo di anodo

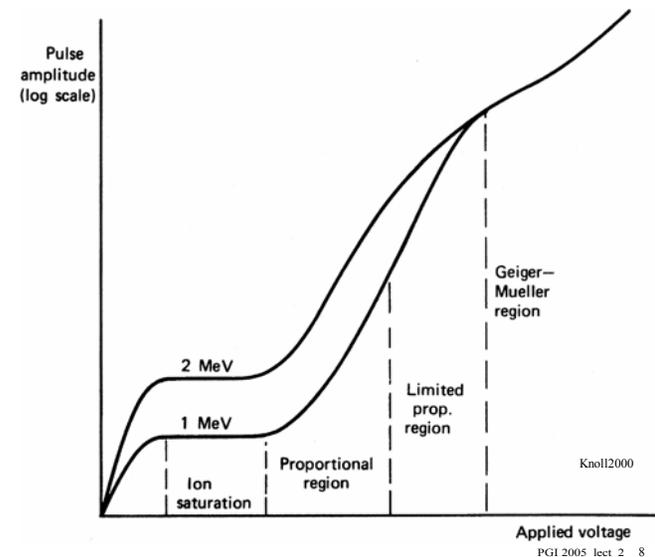
Contatore proporzionale cilindrico

Un contatore proporzionale cilindrico è una struttura coassiale il cui elemento centrale è un filo conduttore di piccolo diametro, mentre l'involucro è un tubo conduttore. Tra filo e tubo è applicata una tensione V che produce un campo elettrico E nel gas.

A partire da una certa tensione applicata, il campo elettrico nel gas, nella regione vicina al filo, raggiunge un valore che permette di accelerare gli elettroni liberi, producendo collisioni ionizzanti. Si sviluppa una valanga a forma di goccia intorno al filo.

Il coefficiente di amplificazione in pratica è tra 10^3 e 10^5 .

Gli elettroni della valanga si muovono verso il filo sul quale sono raccolti molto rapidamente (meno di 1 ns), mentre una nube di ioni positivi si muove lentamente verso il catodo.



È lo **spostamento** della carica degli ioni positivi nel campo di potenziale tra gli elettrodi che genera un impulso tanto sull'anodo che sul catodo. Il contributo del moto della carica degli elettroni alla formazione dell'impulso è solo dell'ordine del percento

La durata dell'impulso è determinata dal tempo necessario agli ioni per raggiungere il catodo: dipende dalla geometria, dal campo elettrico e dalla mobilità degli ioni.

La durata può essere dell'ordine di centinaia di μs , ma l'impulso raggiunge metà della massima ampiezza in un tempo molto breve, circa 1000 volte meno della durata massima.

Con un'amplificazione di 10^4 si ottiene un impulso di carica tipicamente di 10^{-13} C.

Di solito si termina il contatore su una resistenza R in modo che $\tau = RC$ sia piccolo, per aumentare il tasso accettabile.

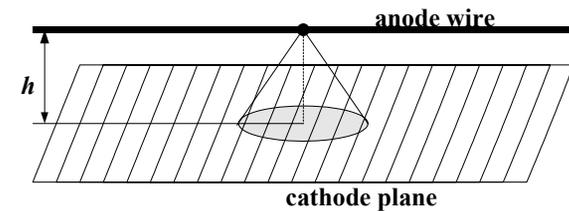
PGI 2005 lect_2 9

Segnale sui catodi

La valanga si sviluppa in pratica alla superficie dell'anodo e l'accoppiamento col catodo è limitato ad una regione nell'intorno della valanga.

Nel contatore cilindrico le cariche indotte sul catodo sono localizzate su un anello intorno alla valanga.

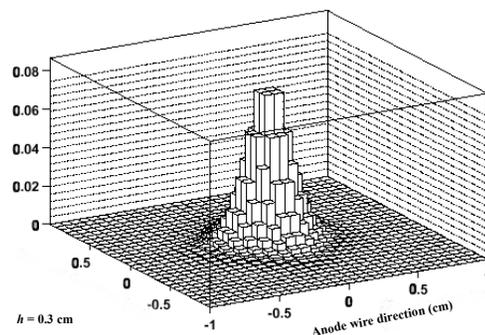
Nelle camere a fili, su ciascuno dei piani di catodo, supporti continui ed equidistanti dal piano contenente i fili di anodo, si osserva un segnale uguale a meno di metà di quello del filo. Supponiamo che il piano di catodo sia suddiviso in un gran numero di celle (*pads*) isolate tra di loro e inizialmente allo stesso potenziale.



PGI 2005 lect_2 10

La distribuzione spaziale dei segnali generati sulle *pads* è praticamente la stessa nella direzione dei fili di anodo e in quella perpendicolare ai fili.

Ha una forma a campana la cui FWHM è dell'ordine di 1.5 volte la distanza h tra anodo e catodo. Quindi circa il 70% del segnale sul catodo è raccolto entro un diametro $1.5 h$.



PGI 2005 lect_2 11

Per ottenere informazioni spaziali si possono leggere i segnali sui catodi segmentati in strisce o a scacchiera. Questi segnali sono necessariamente più piccoli che sull'anodo. La precisione della localizzazione rimane buona, se il rumore è contenuto.

La lettura a soglia sui catodi è fatta di solito per strisce (quasi) perpendicolari alla direzione dei fili e fornisce una seconda coordinata con precisione dell'ordine della larghezza di una striscia.

La lettura su strisce o *pads* sufficientemente piccole misurando l'ampiezza degli impulsi permette il calcolo del baricentro (o altro tipo di *fit*) e una precisione comparabile alla distanza tra i fili.

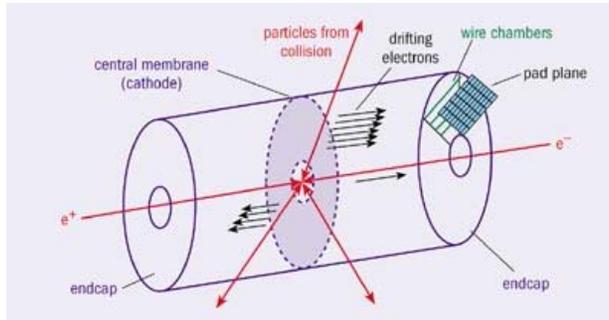
Se strisce o *pads* sono piccole, hanno capacità piccola e quindi condizioni di rumore più favorevoli per l'uso di un preamplificatore molto sensibile

PGI 2005 lect_2 12

Time Projection Chamber (TPC)

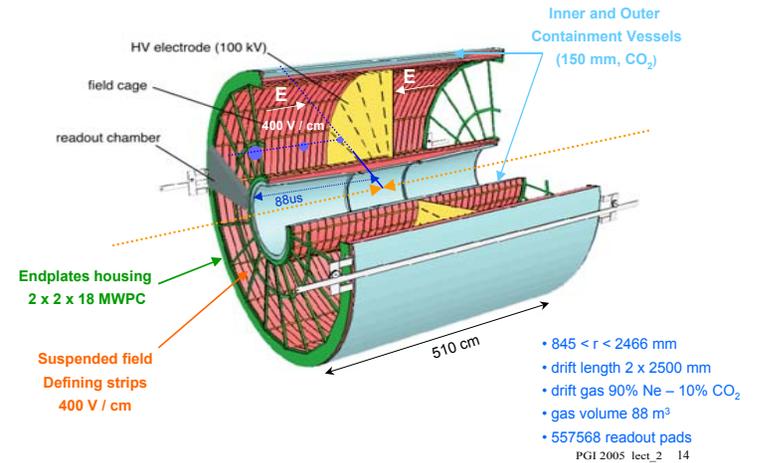
La TPC consiste di 3 elementi:

- un volume di gas (*drift volume*) nel quale le particelle ionizzanti lasciano una traccia;
- una camera a fili (*MWPC*) per rivelare la proiezione delle tracce;
- una griglia per separare i due elementi precedenti.



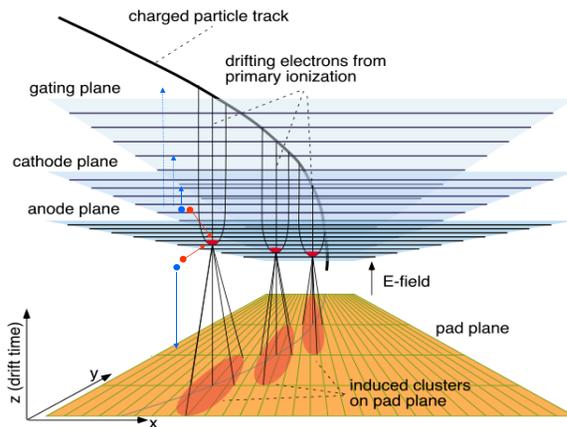
PGI 2005 lect_2 13

ALICE TPC



PGI 2005 lect_2 14

TPC WORKING PRINCIPLE



PGI 2005 lect_2 15

Volume di Drift

Gli elettroni prodotti dalla ionizzazione primaria e secondaria, sotto l'azione del campo elettrico diretto verso la griglia si spostano tutti in modo coerente, conservando le loro posizioni relative.

Il gas contenuto nel volume di *drift* è una miscela di cui il componente principale è un gas nobile.

Un campo elettrico dell'ordine di 50 kV/m è applicato al volume di gas, nella direzione che conduce gli elettroni verso la griglia e la camera a fili.

La velocità di *drift* degli elettroni dipende dalla composizione del gas ed è dell'ordine di 3 - 5 cm/μs; dipende del campo elettrico applicato e dalla temperatura.

Gli ioni positivi derivano allontanandosi lentamente dalla griglia

PGI 2005 lect_2 16

Gli elettroni sono soggetti a collisioni col gas, che provocano diffusione.

(a) In assenza di campi elettromagnetici, una nube di elettroni, localizzata inizialmente in un punto, diffonde in modo che dopo un tempo t ha una distribuzione gaussiana nello spazio. σ è la larghezza della distribuzione, misurata rispetto a un piano che contiene il punto di concentrazione iniziale.

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

Il coefficiente di diffusione $D = \bar{V}\lambda/3$ dipende dalla velocità media degli elettroni \bar{V} e dal libero percorso medio λ .

(b) Se gli elettroni derivano sotto l'azione di un campo elettrico \vec{E} per una lunghezza L_{drift} con velocità media w_{drift} , in assenza di campo magnetico seguono le linee del campo elettrico e diffondono:

$$\sigma = \sqrt{2D \frac{L_{drift}}{w_{drift}}} = \sqrt{\frac{2L_{drift}}{3w_{drift}}} \sqrt{\bar{V}\lambda}$$

PGI 2005 lect_2 17

$$\sigma_T = \sqrt{2D(0) \frac{L_{drift}}{w_{drift}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

Per $\omega^2 \tau^2 \gg 1$
$$\sigma_T = \sqrt{\frac{2L_{drift}}{3w_{drift}}} \frac{\bar{V}^3}{\omega^2}$$

La diffusione nella direzione di \vec{E} (σ_L , longitudinale) rimane come in (b), ossia $\sigma_L \propto \sqrt{\bar{V}}$

(e) Se \vec{E} e \vec{B} non sono paralleli, il movimento di *drift* non segue la direzione di \vec{E}

Cattura degli elettroni

Gli elettroni possono perdersi lungo il percorso se incontrano elementi coi quali possono formare uno ione. Per esempio, su una distanza di drift di 1 m, una concentrazione di O_2 di 1 ppm provoca una perdita dell'1% degli elettroni.

PGI 2005 lect_2 19

(c) In presenza di un campo magnetico \vec{B} la forza di Lorenz influisce sulla componente del moto degli elettroni in piani perpendicolari a \vec{B} e il coefficiente di diffusione trasversale diventa

$$\frac{D(B)}{D(0)} = \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

dove $\omega = eB/mc$ frequenza di ciclotrone degli elettroni
 $\tau = \lambda/\bar{V}$ tempo medio tra due collisioni

Se $\omega^2 \tau^2 \gg 1$
$$D(B) = D(0) \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \approx D(0) \frac{\bar{V}^2}{\omega^2 \lambda^2}$$

d) Se \vec{E} è parallelo a \vec{B} il campo magnetico agisce solo sulle componenti della velocità degli elettroni perpendicolari a \vec{E} e la larghezza della distribuzione di diffusione nel piano perpendicolare a \vec{E} , σ_T diminuisce:

PGI 2005 lect_2 18

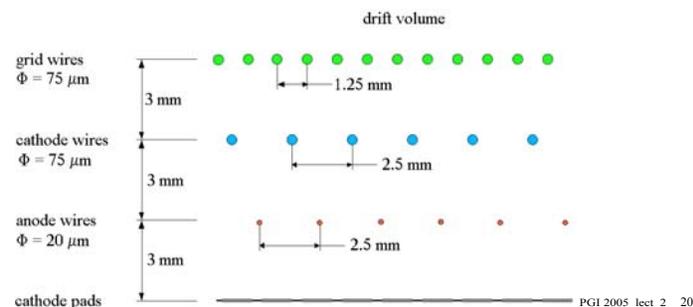
Camera a fili

Attraverso la griglia fluiscono (quasi) tutti gli elettroni contenuti nel volume di *drift*; l'informazione spaziale è riprodotta dal tempo di arrivo e dalle proiezioni sui piani della camera a fili.

Questa è una camera asimmetrica.

Il piano di catodo verso il volume di drift è costituito da fili, mentre il secondo catodo è continuo e suddiviso in *pads*.

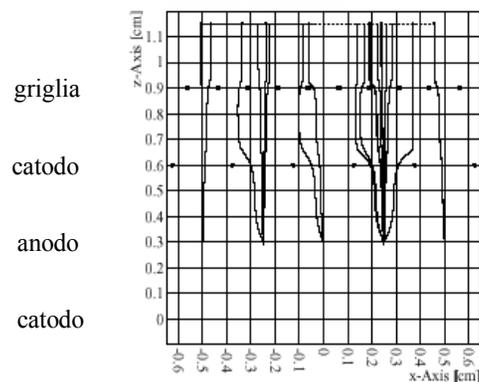
Tra i due sta un piano di fili di anodo che permettono l'amplificazione del segnale nel gas.



PGI 2005 lect_2 20

Il gas nella camera a fili è lo stesso che nel volume di *drift*: sono necessari compromessi nella scelta del gas per ottenere prestazioni accettabili in entrambe le funzioni.

Gli elettroni che hanno concluso il loro viaggio nel volume di *drift* devono evitare i fili di griglia e di catodo superiore per raggiungere i fili di anodo. Le diverse traiettorie comportano tempi di percorso diversi.



PGI 2005 lect_2 21

Il campo elettrico nella camera non è uniforme come nel volume di *drift*. Si producono quindi errori nella determinazione della posizione, dell'ordine della distanza tra i fili di anodo.

Inoltre, in presenza di campo magnetico ci sono ulteriori errori.

Sovente i fili di anodo non sono letti e tutta l'informazione è estratta dalle *pads*.

La lettura comporta per ogni *pad* una misura di ampiezza di impulso, ripetuta al ritmo di un orologio. Il tempo dà la coordinata del punto nella direzione di *drift*; le ampiezze corrispondenti a quel tempo, combinate in modo opportuno, definiscono la posizione del punto nella proiezione sul piano perpendicolare alla direzione di *drift*; la "somma" delle ampiezze relative ai punti successivi di una traccia fornisce informazioni su dE/dx

L'ampiezza su ogni *pad* è determinata dalla geometria.

La risposta in funzione delle coordinate spaziali (*Pad Response Function, PRF*) determina la precisione con cui la valanga è localizzata.

PGI 2005 lect_2 22

Per migliorare la risoluzione

nella direzione di *drift* (tempo):
time bins più piccoli
(*shaping time* breve)

problemi

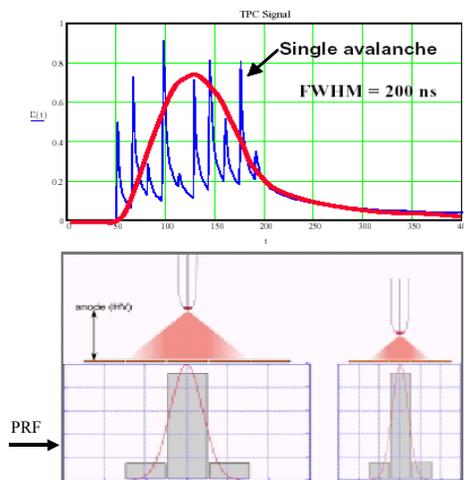
il rapporto segnale rumore
diventa critico
diffusione longitudinale

nel piano delle *pads*

pads più piccole

problemi

il numero di canali aumenta
(costo)
diffusione trasversale



Esistono programmi elaborati che permettono calcolo dei campi elettrici, trasporto e amplificazione e risposta delle *pads*. Tra questi uno dei più sofisticati è **GARFIELD**.

PGI 2005 lect_2 23

Griglia

Gli elettroni prodotti nel volume di *drift* si dirigono verso la griglia e l'attraversano se tutti i fili di griglia sono ad un potenziale V_G , scelto opportunamente negativo rispetto al catodo trasparente della camera.

Se il potenziale dei fili di griglia dispari è aumentato di ΔV e il potenziale di quelli pari è diminuito di ΔV rispetto a V_G , la griglia non permette il transito degli elettroni in arrivo (e degli ioni positivi nella direzione opposta).

La griglia è aperta non appena si ha un *trigger* su un evento interessante ed è chiusa dopo un tempo tale da permettere di attraversarla agli elettroni più lontani appartenenti a quello stesso evento.

Questo modo di funzionamento impedisce che buona parte delle cariche positive degli ioni prodotti nella valanga si accumulino nel volume di *drift*.

PGI 2005 lect_2 24

Parametri da tener sotto controllo

- Amplificazione nel gas: deve essere abbastanza elevata (intorno a 10^4) per assicurare un buon rapporto segnale/rumore (da 20 a 30) nell'amplificatore
- Forma e dimensione delle *pads*: grandi per aver un buon segnale e ridurre i costi; piccole (e snelle) per separare tracce contigue e per una miglior misura del momento
- *Shaping time* del preamplificatore: determina la precisione lungo la direzione di *drift* che dipende da diffusione longitudinale, inclinazione delle tracce, isocronismo lungo le traiettorie degli elettroni nella camera a fili.
- Trasparenza della griglia

Risoluzione spaziale

Errori dipendenti dalla natura fisica della TPC

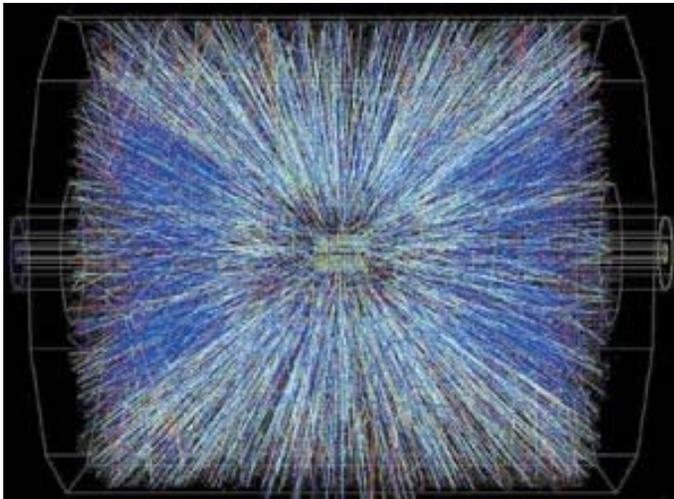
- diffusione trasversale \iff *pad resolution function*
- diffusione longitudinale \iff *shaping time* e frequenza orologio ADC
- imperfezioni del campo elettrico nello spazio di *drift*
- velocità di *drift* \rightarrow temperatura!
- imperfezioni del campo magnetico
- distorsioni del campo elettrico dovute al flusso di ioni positivi
- cattivo isocronismo delle traiettorie tra griglia e anodo
Dell'ordine della distanza tra i fili di anodo

Errori dipendenti dal tipo di evento:

- *Pileup* di due tracce vicine nella direzione di *drift*
- Sovrapposizione di due tracce nella proiezione sul piano delle *pads*

Risoluzione in dE/dx

Dominata dalla statistica della ionizzazione.
Per tracce di 1 m, dell'ordine del 10%



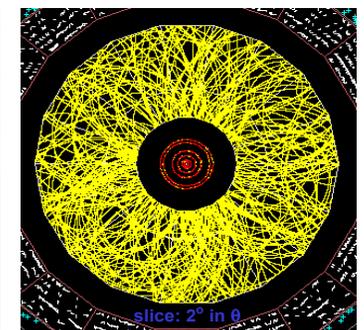
Side view of the STAR TPC

The ALICE Event Display

Projection of the drift volume into the pad plane

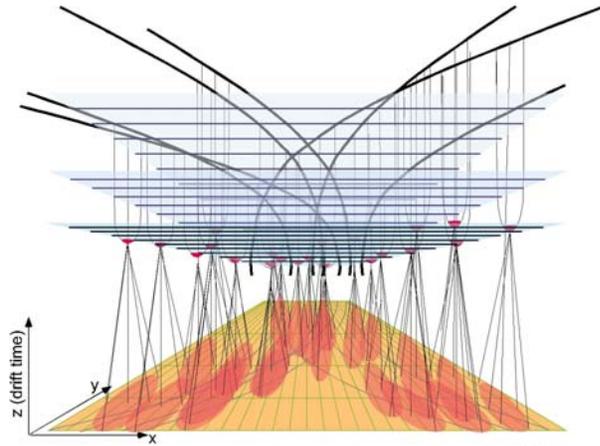


Projection of a slice (2° in θ)
 $dN_{ch} / dy = 8000$



L. Musa, CERN

TPC WORKING PRINCIPLE



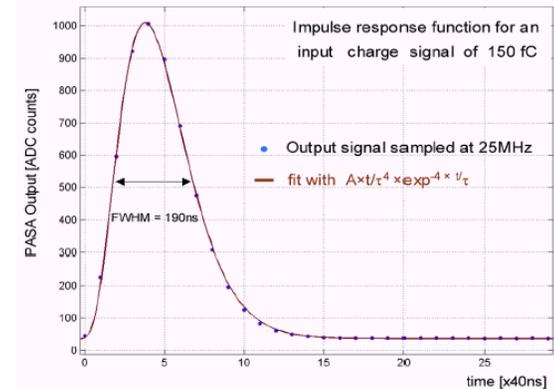
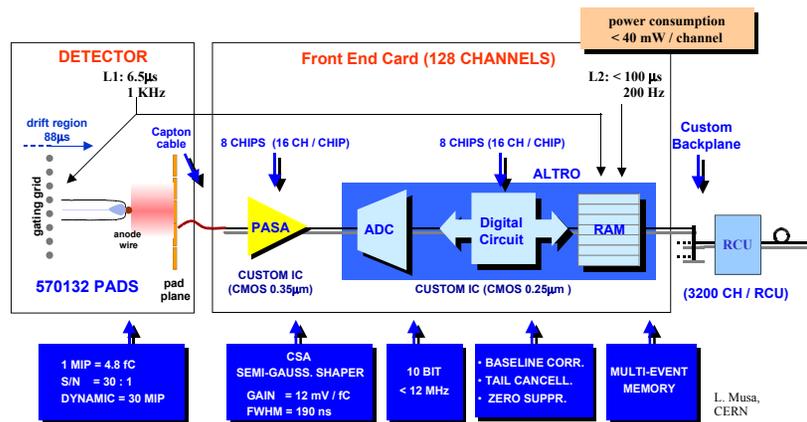
Elettronica di lettura della TPC

L'elettronica amplifica il segnale prodotto sulle *pads* e lo mette in forma (*shaping*) (PASA); ne fa un campionamento nel tempo al ritmo di un orologio e misura l'ampiezza di ogni campione (ADC).

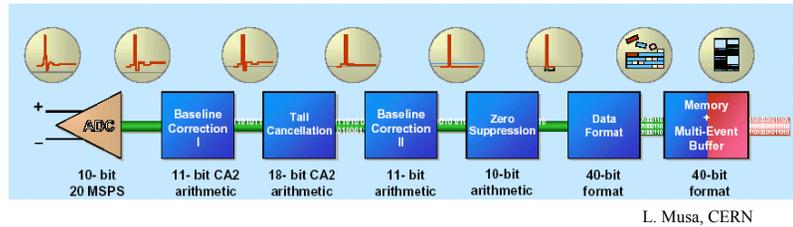
Il metodo di lettura usato nelle prime tpc consisteva nell'inviare il segnale dopo amplificazione in una CCD (*charge coupled device*) che funziona come uno *shift register* analogico che avanza a 10 MHz. Nelle successive celle si trovava così un'immagine dell'impulso, ampiezza in funzione del tempo. Quando si ha un trigger l'orologio rapido è fermato e parte un nuovo orologio lento che permette ad un ADC di leggere il contenuto di ogni cella della CCD.

Grazie ai progressi negli ADC, tanto in velocità di conversione quanto in prezzo, ora è possibile leggere l'informazione in sincronismo colla velocità di *drift*.

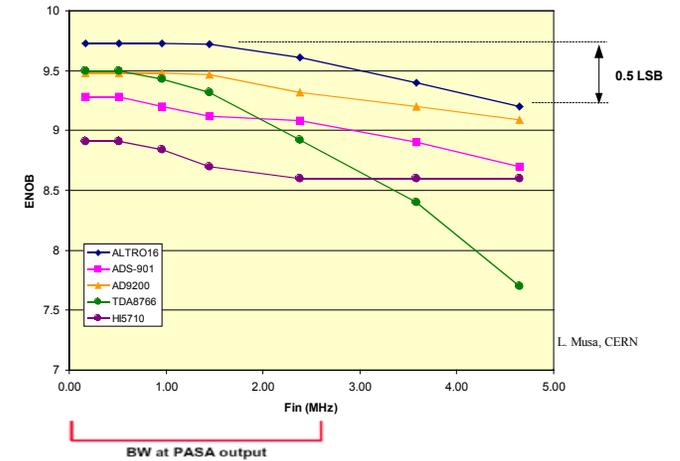
Esempio: la TPC di ALICE



ALICE TPC READOUT CHIP (ALTRO)



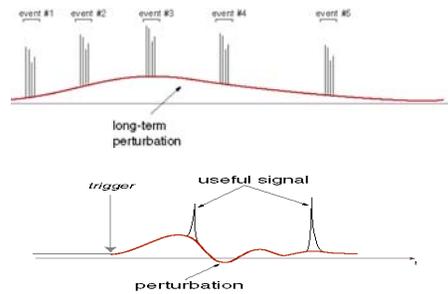
Effective Number of Bits vs Input Frequency



Correzioni digitali

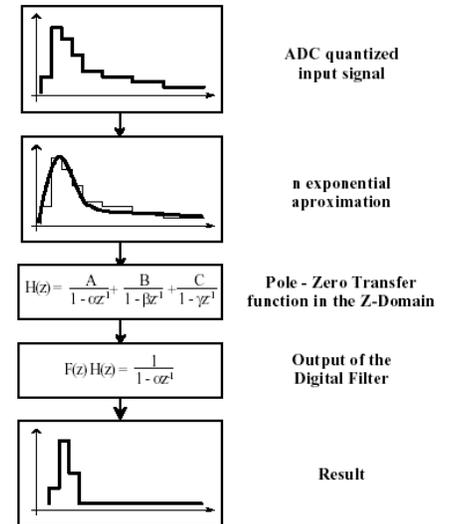
. Correzione della linea di base (1)

Perturbazioni lente: temperatura
 Perturbazioni prevedibili: in generale associate col *trigger*,
 per es. influenza della tensione di griglia



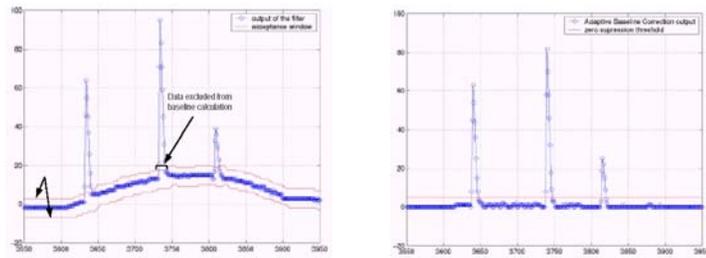
. Correzione della coda

Filtro *pole-zero*

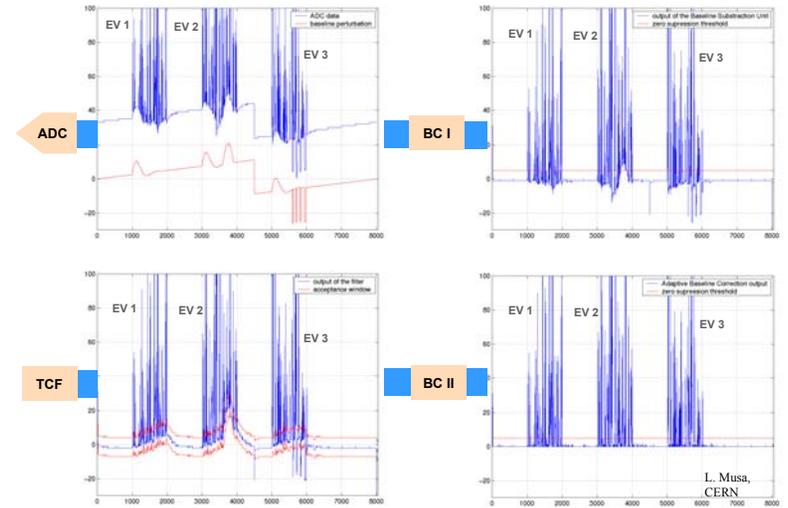


. Correzione della linea di base (2)

Perturbazioni associate all'impulso del rivelatore e alla sua storia, quindi effetti non sistematici
 Calcolo del valor medio istantaneo (*moving average*)



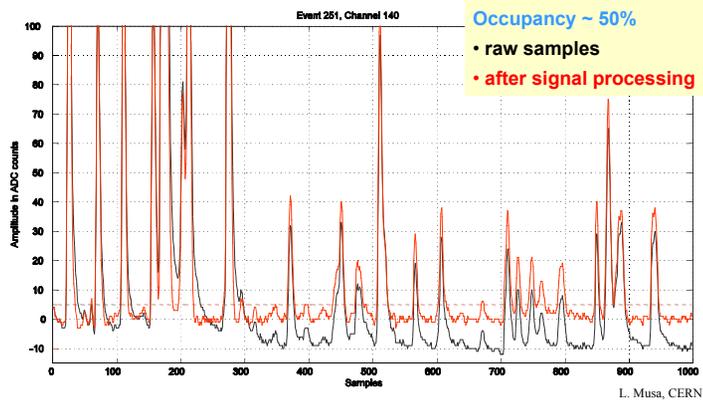
PGI 2005 lect_2 37



PGI 2005 lect_2 38

ALIRO Signal Processing

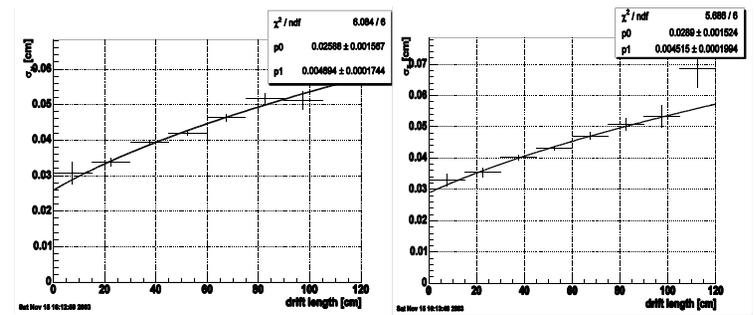
HIGH MULTIPLICITY COSMIC RAYS



L. Musa, CERN

PGI 2005 lect_2 39

**ALICE TPC Sector Test
 Space-point resolution in $r\phi$ and z**



Extrapolation:
 • to 0 $\sigma_{r\phi} = 240\mu\text{m}$
 • to 250cm $\sigma_{r\phi} = 750\mu\text{m}$
 diffusion over 250 cm gives $640\mu\text{m}$

Extrapolation:
 • to 0 $\sigma_z = 300\mu\text{m}$
 • to 250cm $\sigma_z = 750\mu\text{m}$
 diffusion over 250 cm gives $640\mu\text{m}$

L. Musa, CERN
 PGI 2005 lect_2 40

Referenze

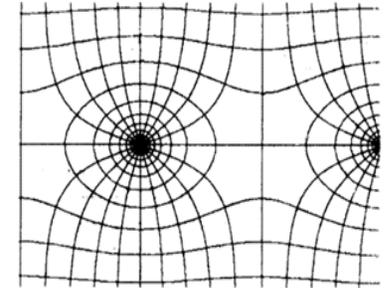
- generali:
 - F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, CERN 77-09. 3 May 1977, <http://doc.cern.ch/yellowrep/1977/1977-009/p1.pdf>
 - W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, 2nd ed., Springer 1994
 - G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurements, 3rd ed., Wiley 2000
- calcolo dei campi elettrici e della forma del segnale:
 - R. Veenhof, GARFIELD, <http://consult.cern.ch/writeups/garfield/>
- TPC:
 - D. Nygren, PEP Summer Study 1975, PEP 178 (1975) 125-133, <http://www.slac.stanford.edu/pubs/confproc/pepss75/pepss75-023.html>
 - ALICE, Technical Design Report of the Time Projection Chamber, <http://alice.web.cern.ch/Alice/documents.html>
 - L. Musa, The ALICE Time Projection Chamber http://ep-ed-alice-tpc.web.cern.ch/ep-ed-alice-tpc/doc/presentations/CERN_Detector_Seminar_Feb_2004/TPC.ppt

PGI 2005 lect_2 41

Appendice: Fast OR

Il **Fast OR** è nato colle camere proporzionali (MWPC), per produrre il segnale di un piano di fili: dipende dal meccanismo di formazione del segnale su ciascuno dei fili.

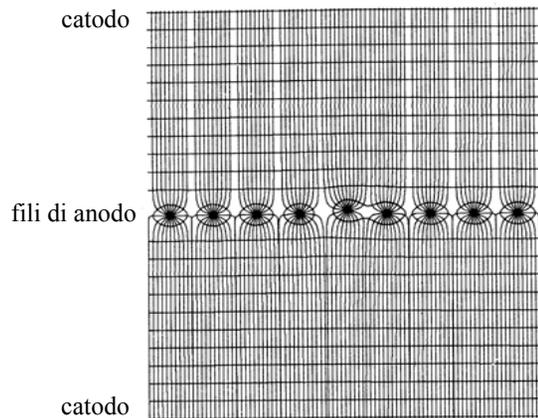
Le camere proporzionali consistono di un piano di fili di anodo tesi tra due piani di catodo.



Il campo elettrico vicino agli anodi ha quasi simmetria cilindrica, come in un contatore cilindrico.

PGI 2005 lect_2 42

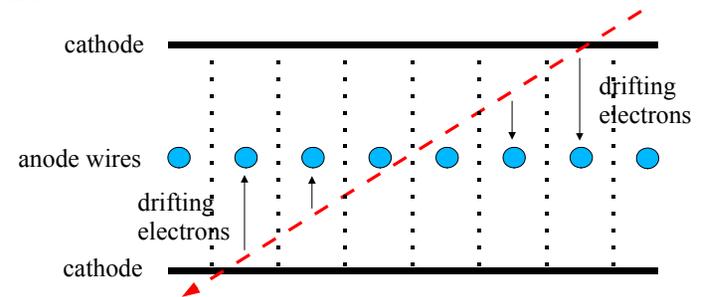
A partire da una certa distanza dal piano dei fili di anodo e fino al catodo, il campo è praticamente uniforme; in esso gli elettroni primari derivano senza produrre collisioni ionizzanti.



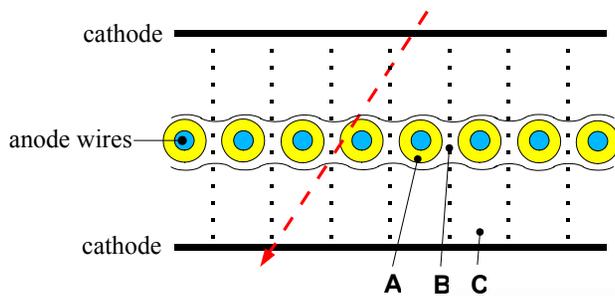
PGI 2005 lect_2 43

Segnale sugli anodi

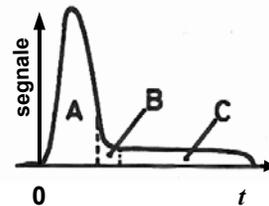
Il passaggio di una particella non corrisponde necessariamente a un segnale prodotto su un solo filo. Secondo l'inclinazione, i fili possono essere molti (*clusters*), e la precisione dipende, tra l'altro, dall'efficienza di rivelazione di ciascuno dei fili verso cui derivano elettroni di diverse condizioni iniziali: un cluster di 6 fili in una camera con efficienza 99% ha una probabilità del 6% di di avere un "buco".



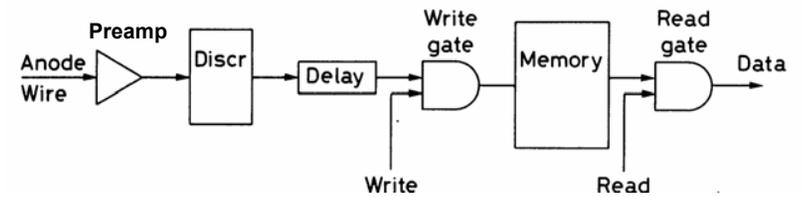
PGI 2005 lect_2 44



La risposta in tempo dipende dalla posizione iniziale degli elettroni, secondo che siano stati depositati nel campo a simmetria quasi cilindrica intorno al filo (A), nella regione tra due fili (B) ovvero nella regione di *drift* (C).



Sistema di lettura di camere a filo



Il preamplificatore è preferibilmente un preamplificatore di carica con sensibilità di qualche migliaio di elettroni.

Da notare che la capacità del filo (tipicamente 4 pF/m) influisce sul rumore.

Di solito il preamplificatore è installato sulla camera, ma soluzioni con un cavo intermedio sono state usate.

Il **Fast OR** produce un segnale temporale più preciso se:

- la MWPC è attraversata da tante particelle simultanee;
- le particelle attraversano la MWPC a grande angolo rispetto alla normale al piano dei fili.

