Rivelatori di Muoni

- Introduzione
- Cosa vuol dire misurare i Muoni
- Principi di funzionamento dei Rivelatori di Muoni
- Esempio di un Sistema di Rivelatori di Muoni
  nell' esperimento Compact Muon Solenoid
- Camere a Deriva di CMS e costruzione
  di Camere a Torino

Lezioni sui Rivelatori
Torino - 26 Aprile 2004
Silvia Maselli - INFN

Da dove vengono e come "vediamo" i Muoni

Maggior sorgente di muoni:

in Natura: raggi cosmici ~102 muoni/m^2.sec, E>1GeV

in laboratorio: prodotti dal decadimento di particelle instabili

In questa lezione Muoni generati in esperimenti agli acceleratori.

Il canale di decadimento in muoni e' "facile" da rivelare con grande precisione e basso rumore di fondo poiche' i Muoni non interagiscono fortemente.

I Sistemi di Rivelatori di Muoni ci permettono di "vedere" nel modo piu' accurato possibile le sue proprieta':

* Identificazione
* Energia/momento
* Traiettoria
* Tempo

Unita' di misura e grandezze utilizzate in seguito

Momento = p = Massa x Velocita'

Energia, Massa e Momento

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

Unita': electronVolt (eV)
1 eV e' l'energia guadagnata
da un elettrone che attraversa
la differenza di potenziale di 1 V

Multipli: MeV (10^6 eV), GeV (10^9 eV),TeV (10^{12} eV)

Coordinate, Tempo:
sottomultipli del m e del s:
ad es.μm (10^{-6} m), ns (10^{-9} s)

Sezione d'urto (σ): Probabilita' di interazione tra particelle elementari.
Unita': sottomultipli del m^2 · (1 barn = 10^{-28} m^2)

Identificazione dei Muoni di alta energia

- Sono considerati particelle stabili (muoni di 100 Gev/c percorrono 700 Km prima di decadere).
- Sopra qualche GeV sono identificati grazie al loro basso tasso di interazione con la materia. Le interazioni con la materia sono di origine elettromagnetica. La perdita media di energia e' di qualche $Mev.g^{-1}.cm^2$.
- Se una particella carica penetra un assorbitore sufficientemente spesso rilasciando poca energia e cambiando poco la sua traiettoria questa particella e' considerata un Muone.

1) Attraverso le interazioni em i muoni cambiano direzione (diffusione multipla) .

2) Altre particelle prodotte nelle interazioni creano sciami negli assorbitori che possono uscire (punch through) dall'assorbitore e peggiorare l'identificazione di Muoni .

Misura del momento

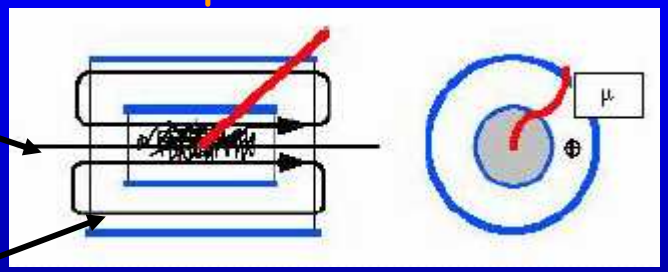
(Spettrometro magnetico)

- La misura del momento avviene applicando la formula della Forza di Lorentz: le particelle cariche seguono delle traiettorie circolari, o elicoidali, intorno alla direzione del campo.

$$p_t = 0.3Br$$

- Diverse configurazioni del campo magnetico:

Una possibilita' per esp. al collider e' il campo magnetico solenoidale, in cui i fasci si muovono parallelamente al campo magnetico (quindi senza subirne l'influenza). Il campo magnetico agisce dunque sulla componente trasversa delle particelle prodotte.



Linea di fascio

Campo magnetico

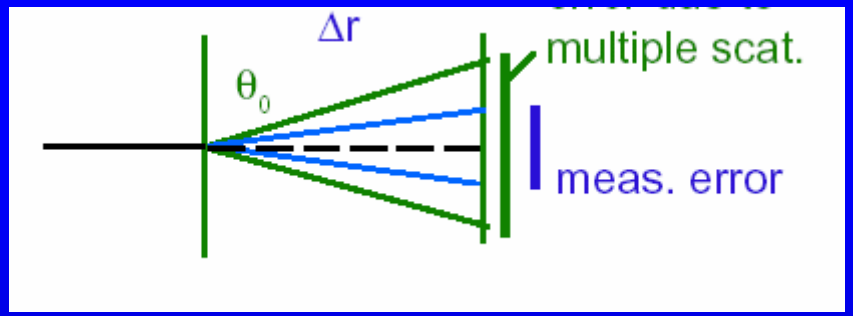
Misura del momento (cont.)

La determinazione del momento e' condizionata dall'entita' del campo magnetico dalla precisione dei rivelatori di traccia …

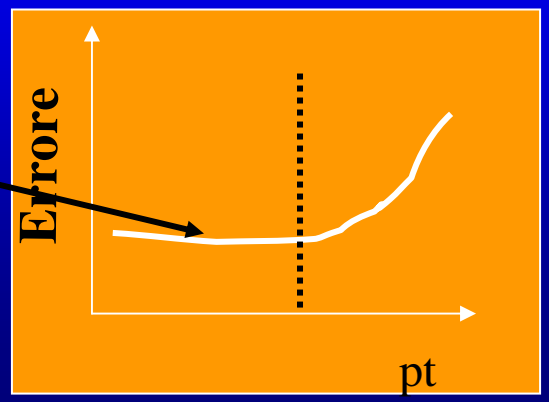
Errore sul momento $= \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_x \frac{8p_T}{0.3BL^2}$

… ma anche dalla diffusione multipla:

Se l'errore sull'estrapolazione da un piano di rivelatore ad un altro e' piu' grande della precisione del rivelatore la risoluzione sul momento e' degradata.



Contributo della diffusione multipla sull'errore delmomento e' indipendente dal momento stesso e dipende da 1/B.



Rivelatori di traiettoria dei Muoni

- Caratteristiche:
  misurare coordinate precisamente (~100 μm)
  rivelatori di grande area (oltre l'assorbitore)
  misura del tempo per eventi ad alta frequenza (trigger).

Due categorie di rivelatori di traccia per i Muoni:

- Scintillatori: interazione produce scintillazione=luce raccolta e trasformata in segnale elettrico
- Rivelatori a gas: interazione con gas (liquidi) produce ionizzazione. I prodotti della ionizzazione sono (visualizzati) raccolti per formare un segnale elettrico.

Rivelatori a Gas

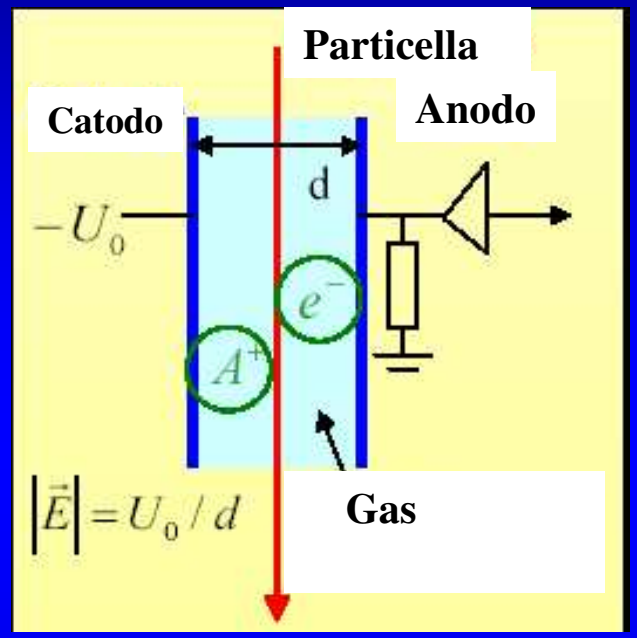
Caratteristiche e processi che stabiliscono il principio di funzionamento:

- Geometria dei rivelatori
- Ionizzazione del gas
- Deriva degli ioni
- Amplificazione : moltiplicazione degli ioni
- Scelta del gas

Geometria dei rivelatori a gas

Schema di base di un rivelatore a facce piane parallele.
es. Resistive Plate Chamber.

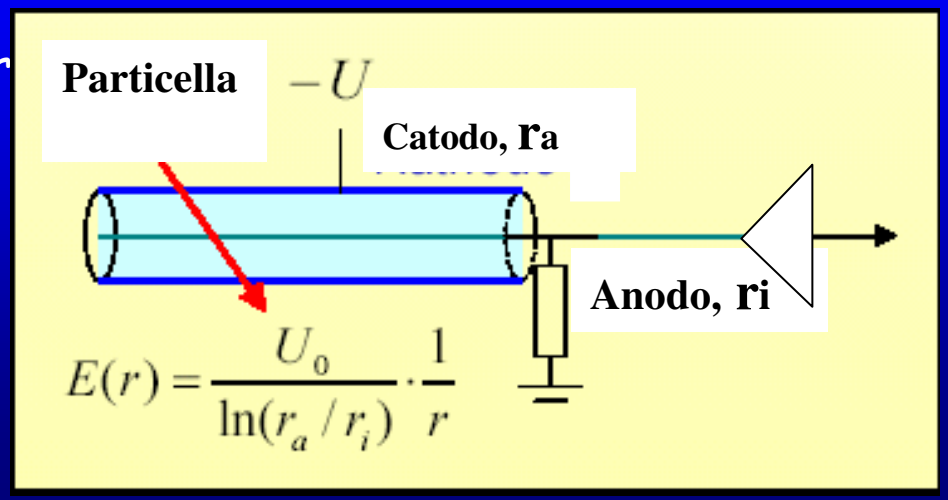
Campo Elettrico uniforme.



Schema di base di un rivelatore a fili a geometria cilindrica
es. Multi Wire Proportional Chamber
Camere a Deriva.

Quasi indipendenza del segnale dal luogo della ionizzazione primaria.

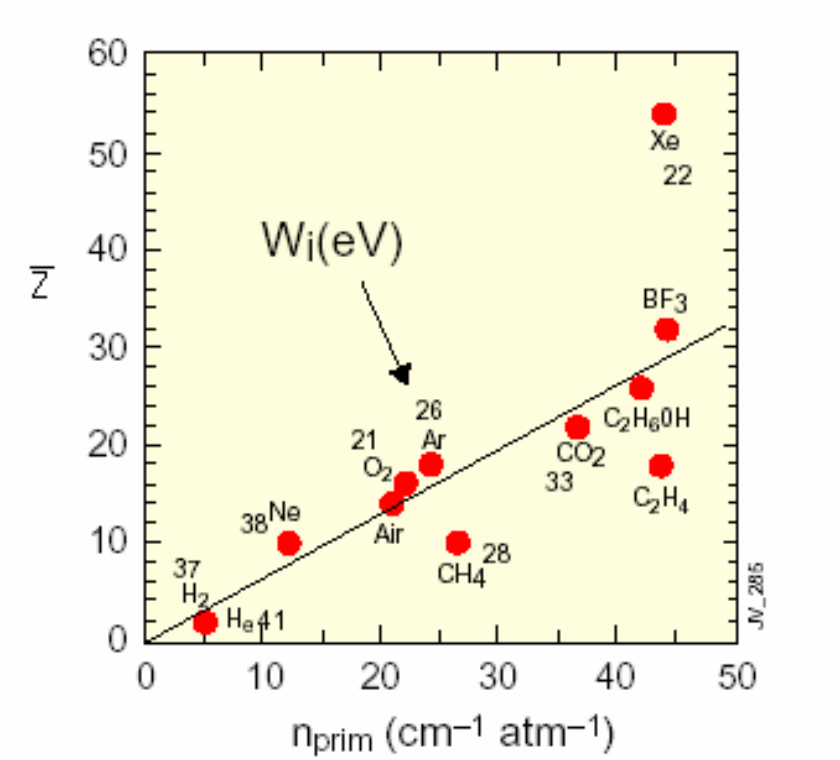
Campo Elettrico ~1/r



Processo di ionizzazione

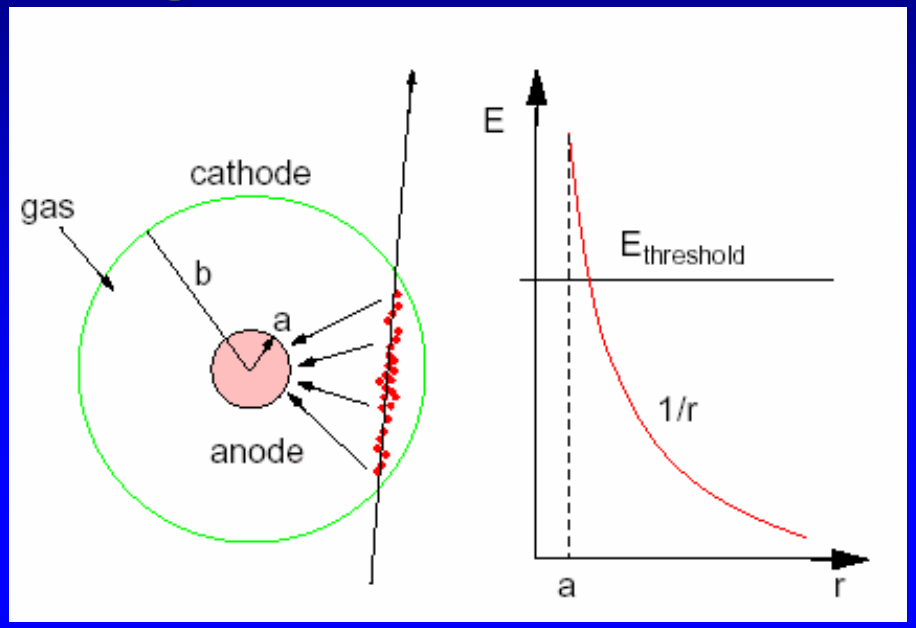
Col passaggio di una particella carica in un gas un elettrone viene rimosso da un atomo o da una molecola in modo da creare una coppia elettrone-ione positivo. Il gas e' il mezzo piu' naturale per la raccolte dei prodotti di ionizzazione poiche' in esso gli ioni hanno una grande mobilita'.

Le particelle ionizzano se hanno un'energia tale da creare una coppia e-ione.



In un gas come l'Argon si crea una carica totale di circa 100 elettroni/cm che non e' facile da rivelare -> amplificazione

Deriva degli ioni nel rivelatore

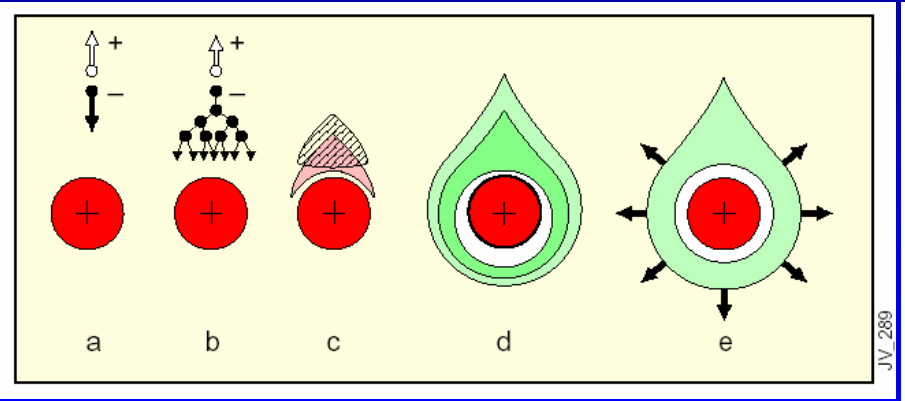


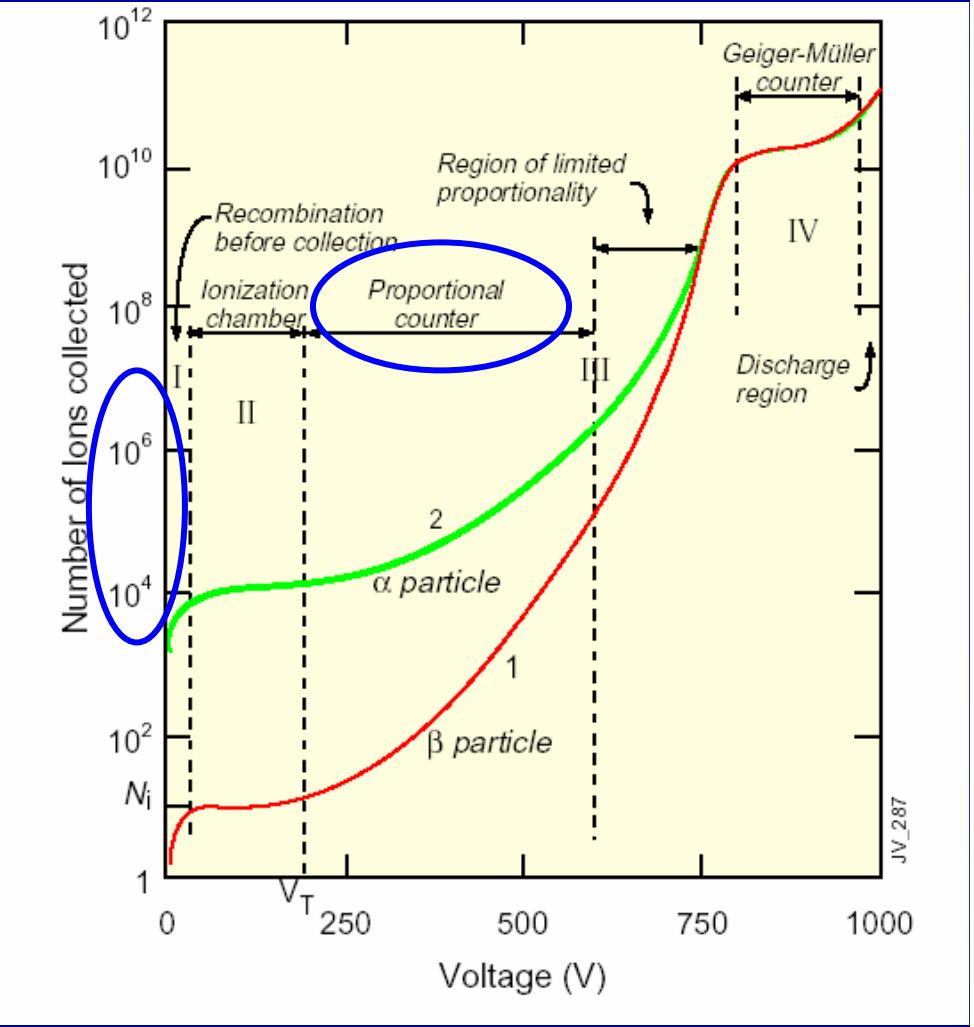
Velocita' di deriva degli elettroni rispetto agli ioni positivi

$$v_D^- \approx 10^3 \cdot v_D^+$$

Il campo elettrico vicino all'anodo e' abbastanza alto da fornire agli elettroni un'energia tale da ionizzare -> crescita esponenziale di ioni

Moltiplicazione a valanga





Fattore di moltiplicazione =

$$M = \frac{n}{n_0} \sim e^{CV_0}$$

n_0 = numero originario di e-

V_0 = potenziale di amplificazione

50% (90%) degli elettroni sono prodotti a 2.5 mm (10 mm) dal filo anodico

Scelta del Gas

La componente principale e' quasi sempre un gas nobile (es. Argon) poiche' permette il processo di moltiplicazione con un campo elettrico relativamente basso.

Un contatore riempito solo di Argon non funziona stabilmente. Durante la creazione della valanga molti atomi di Argon possono essere eccitati e decadere emettendo fotoni ultrvioletti. Questi fotoni possono colpire l catodo emettendo foto-elettroni che danno origine ad altre valanghe. -> Scariche

Si aggiungono all'Argon degli altri gas per assorbire i fotoni emessi (processo di quenching).
Gas solitamente usati (CO_2, Isobutano C_4H_{10}, Metano CH_4).

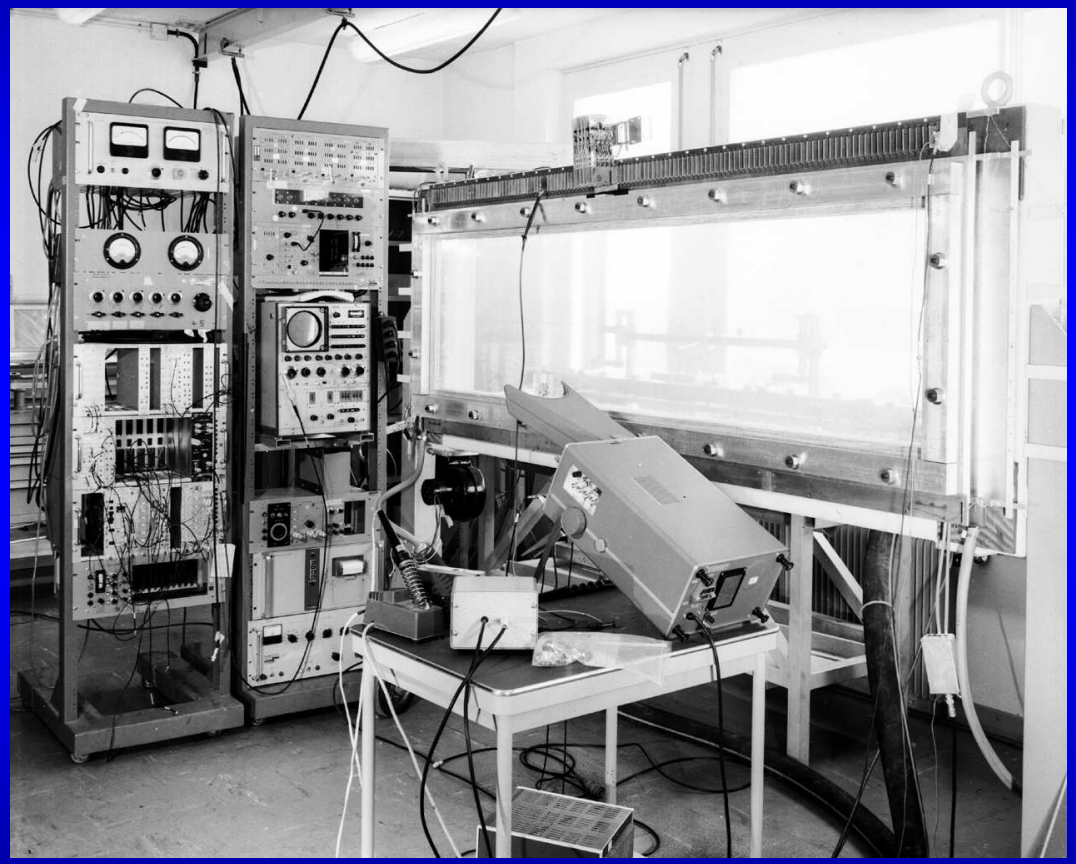
Alcuni tipi di rivelatori a gas per la rivelazione dei Muoni

- Multi Wire Proportional Chamber
- Camere a Deriva
- Cathode Strip Chamber
- Resistive Plate Chamber
- (Time Projection Chamber)

CMS, ATLAS, LHCB, ALICE

MWPC

Inventate nel 1968 da Charpak.

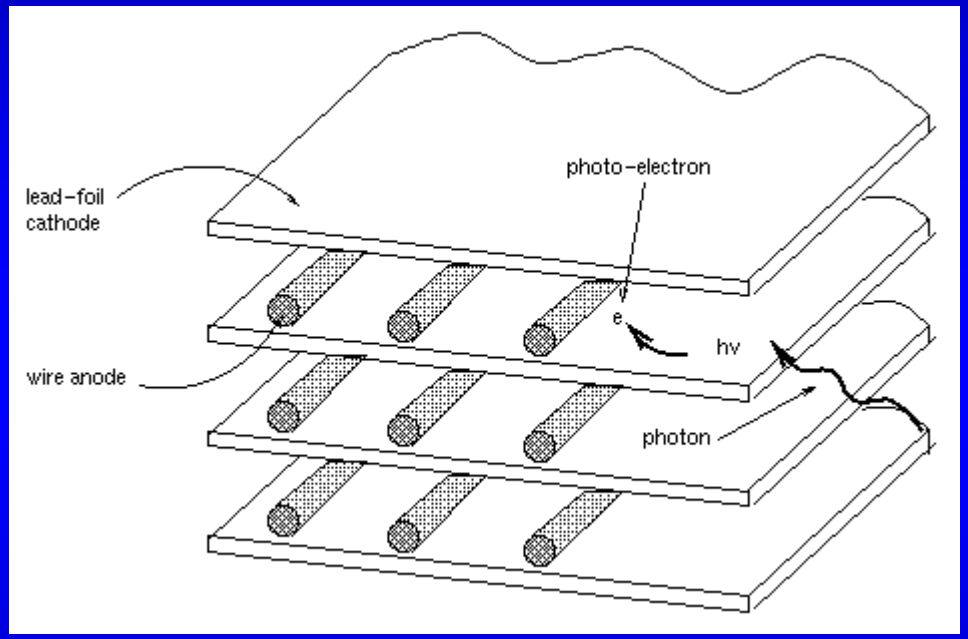


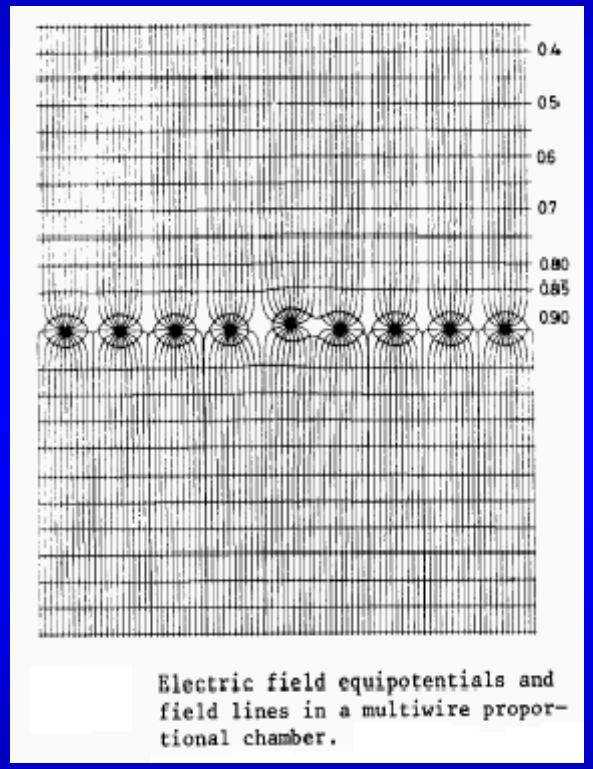
June 1970

Multi-wire proportional chamber 2x0.5 m al PS17

MWPC

Costituite da una serie di fili sottili, che fungono da anodo spaziati circa 2 mm e distanti circa 7-8 mm dalle pareti piane, che costituiscono il catodo.





Electric field equipotentials and field lines in a multiwire proportional chamber.

Linee di campo elettrico parallele lungo tutto il rivelatore eccetto che nella regione vicino ai fili dove il campo ha una dipendenza 1/r .

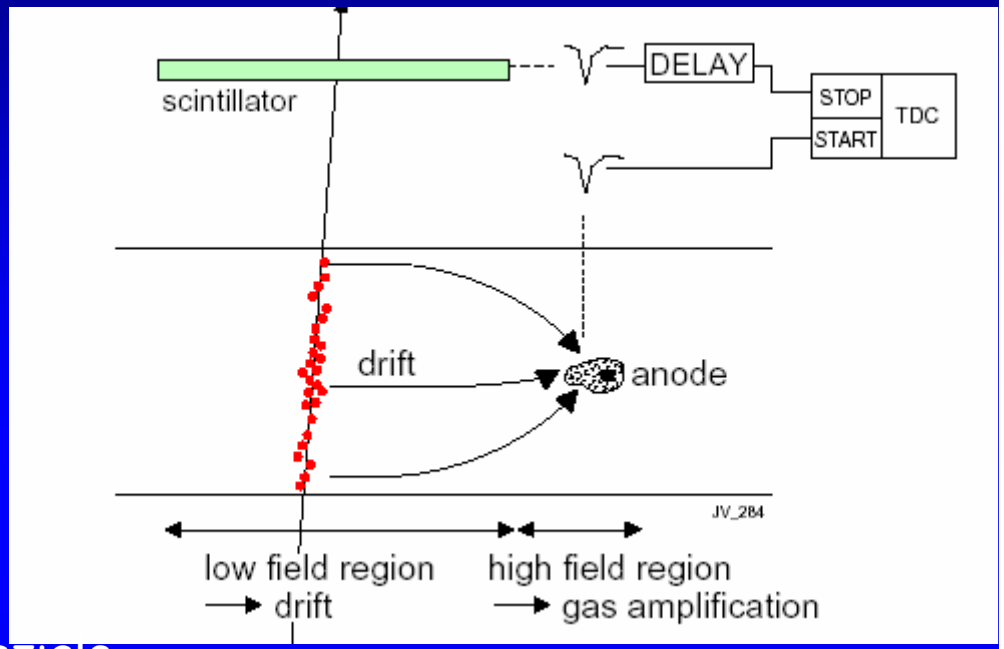
Risoluzione spaziale 300 - 600 μm

Camere a Deriva

(Bressani,Charpak et al 1969)

Camere proporzionali con una grande distanza tra gli anodi (alcuni cm)

- misura della coordinata = tempo di arrivo degli elettroni
- velocita' di deriva degli elettroni ~ 5 cm/μs
- Risoluzione temporale di 1 ns corrisponde ad una risoluzione spaziale di 50 μm
- Diverse configurazioni di catodi/elettrodi forniscono un campo elettrico costante
- Diverse geometrie possibile: planare, cilindrica



$$d = v_d(t_f - t_0)$$

Camere a Deriva (cont.)

Più piani di camere a deriva per determinare una traiettoria con fili orientati in diverse orientazioni offrendo per ricostruire la traccia in 3 dimensioni.

Precisione meccanica di costruzione e posizionamento dei fili.
Tensionamento dei fili (per fili lunghi) per contrastarne il loro stesso peso.

Conoscenza precisa della velocità di deriva -> scelta del gas è fondamentale
In alcuni gas esiste un certo range di campo elettrico in cui la velocità di deriva degli elettroni ha un valore costante. -> indipendente dalle disomogeneita' del campo elettrico.

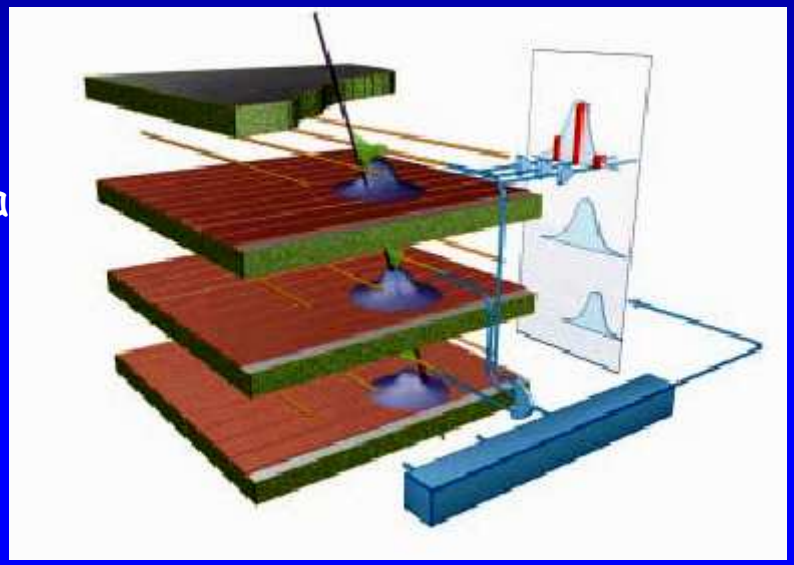
Importanza della purezza del gas: la presenza di elementi elettronegativi (ossigeno) potrebbero catturare gli elettroni nel loro moto di deriva verso l'anodo

La risoluzione spaziale di una camera a deriva dipende anche dalla diffusione degli elettroni che e' direttamente proporzionale alla lunghezza del percorso. -> percorsi di deriva limitati a qualche cm

Cathode Strip Chamber

Stesso principio di funzionamento delle MWPC. In piu' ...

La carica degli ioni positivi creati vicino all'anodo puo' essere rivelata per accoppiamento capacitivo anche sul lato del catodo. Il piano del catodo e' cosi segmentato in strips.



Misura della coordinata della valanga lungo la direzione del filo anodico attraverso il segnale di alcune strips consecutive.

-> lettura del segnale bidimensionale

Precisione sulla misura delle coordinate:

50-100 μm lungo la direzione del filo

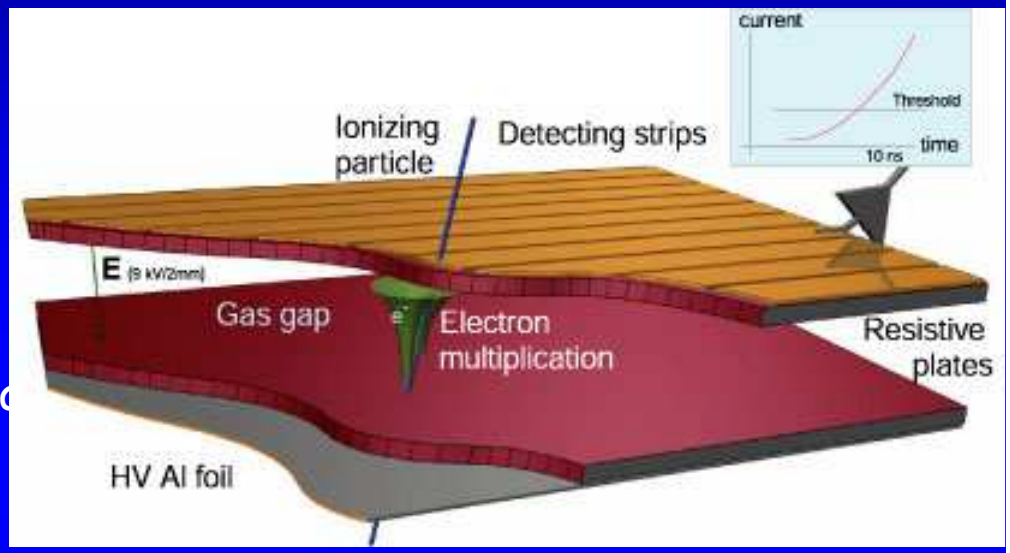
300 – 500 μm perpendicolare alla direzione del filo

Resistive Plate Chamber

Rivelatori con ottime prestazioni
per la misura dei tempi (~ 1ns)
paragonabile agli scintillatori. -> Trigger

Rivelatore a gas a facce piane parallele
costituito dal materiale molto resistivo
-> flusso di particelle ad alta frequenza
(fino ad 1 KHz)
-> alto guadagno nel segnale (~ 10^7)

Segnale raccolto da strips.

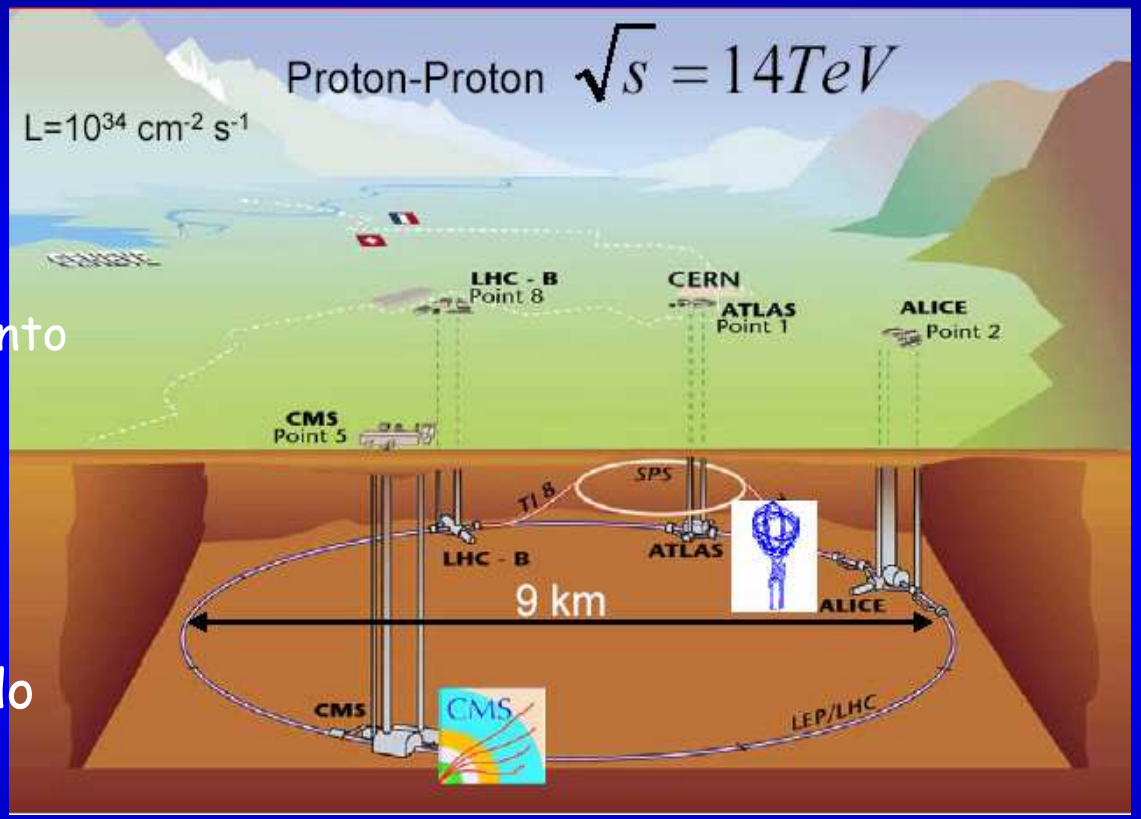


The Large Hadron Collider

14 TeV di energia disponibile per la produzione di nuove particelle.

(Temperatura di raffreddamento dei magneti 1.9 Kelvin)

Altissima Luminosita'
10^{34} cm^{-2} s^{-1} ~numero di eventi prodotti al secondo nell'interazione dei fasci.



3500 Milioni di Franchi Svizzeri

The Large Hadron Collider

Interazioni protone-protone ogni 25 ns.
Ricerca dei segnali nel fondo di eventi generati molto difficile:

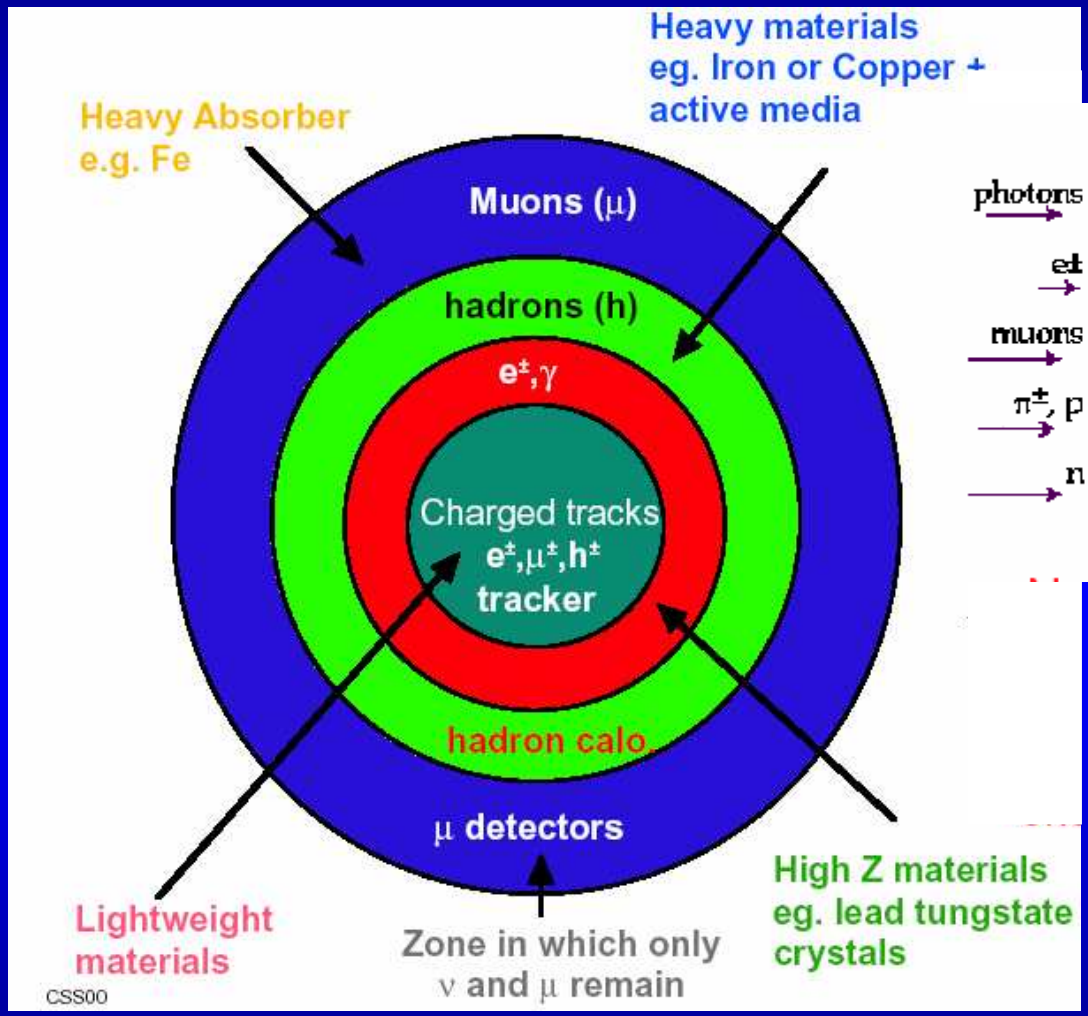
- 1 miliardo di interazioni al secondo che corrispondono a circa 100 miliardi di particelle generate al secondo
- Gli eventi interessanti per esempio l' Higgs avvengono con una frequenza di 1 su 10.000 miliardi di eventi.

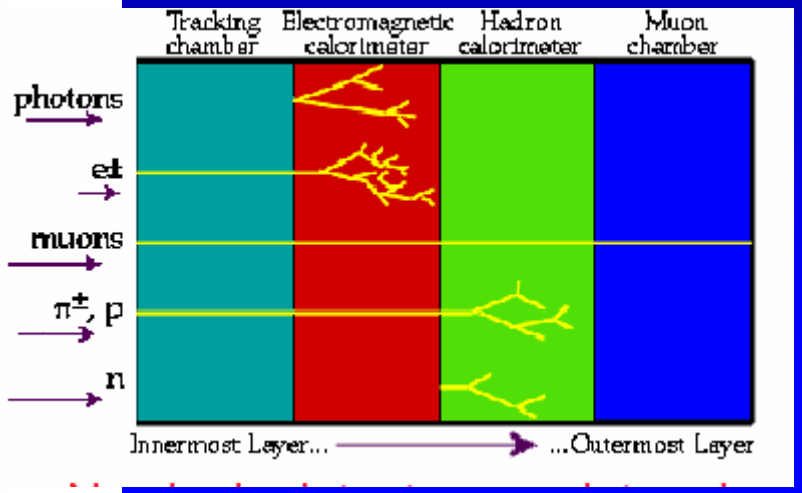
Per estrarre il segnale interessante sopra il fondo bisogna considerare i decadimenti delle particelle generate nella collisione in

Fotoni e Leptoni (per esempio -> **MUONI**)

Lo svantaggio e' che la probabilita' che il segnale decada in fotoni/leptoni e' piu' piccola rispetto ad altri canali di decadimento.

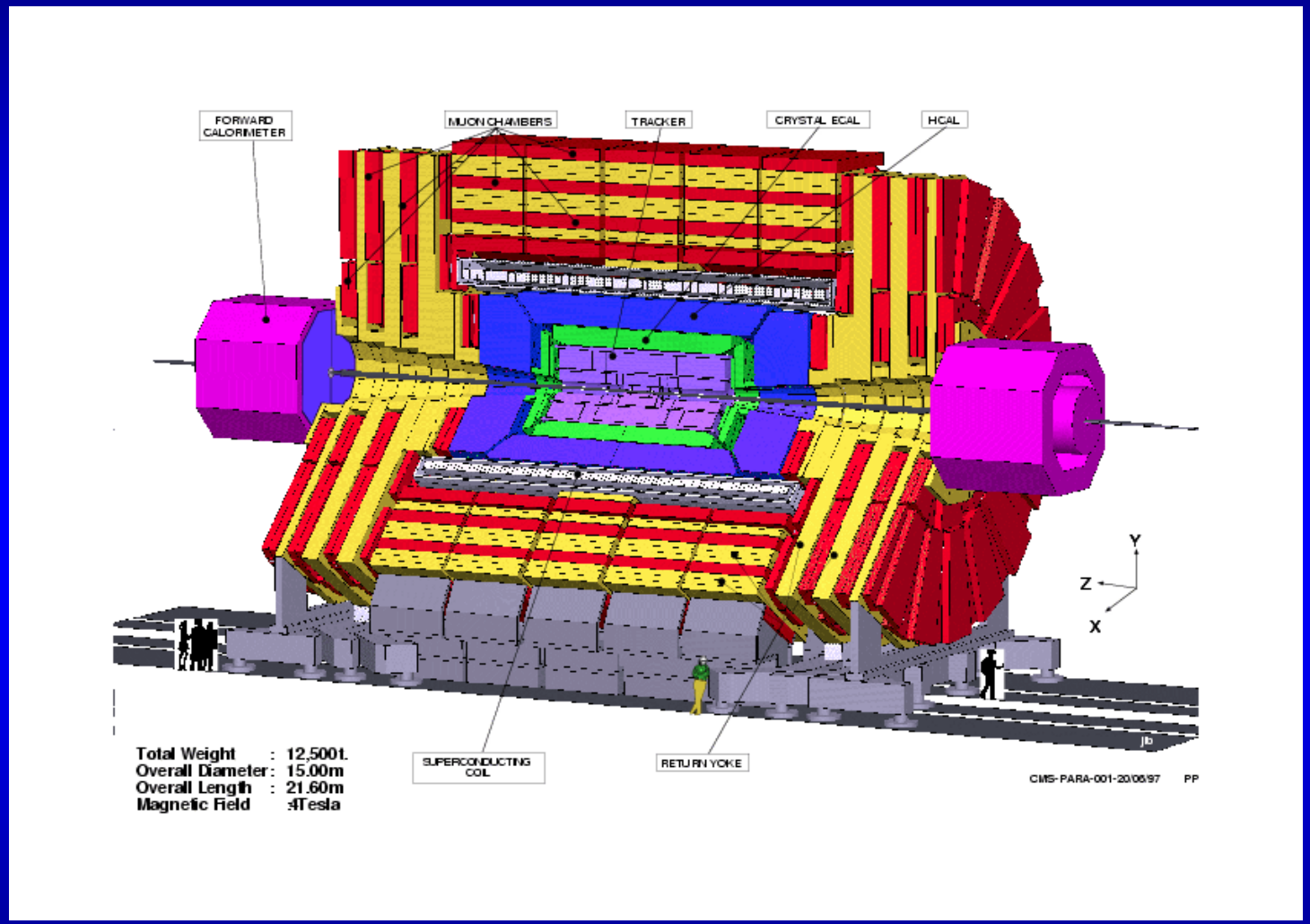
Esprimenti al Collider





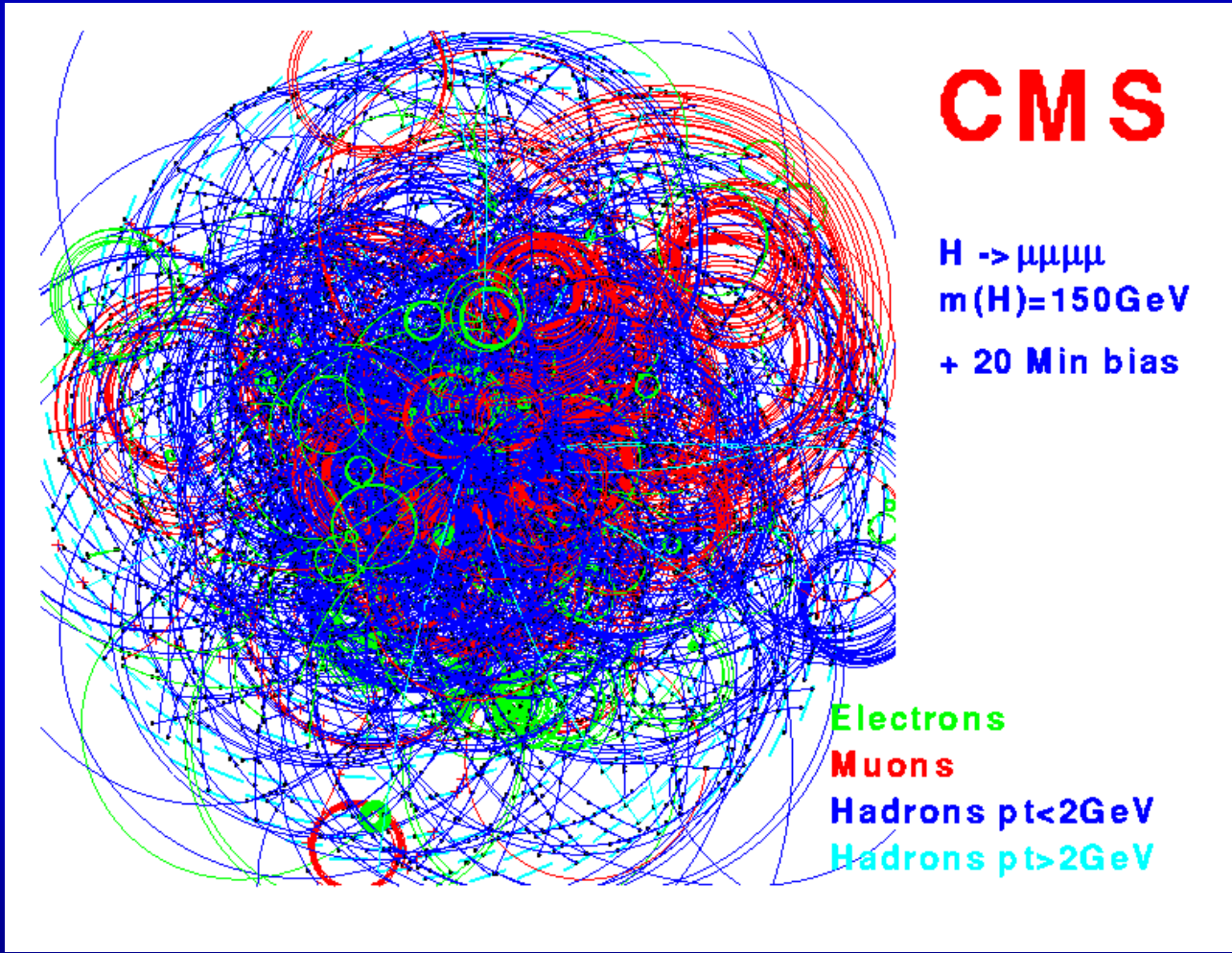
Ogni strato dell'esperimento misura le particelle che non sono state misurate nello strato precedente.

L'esperimento Compact Muon Solenoid

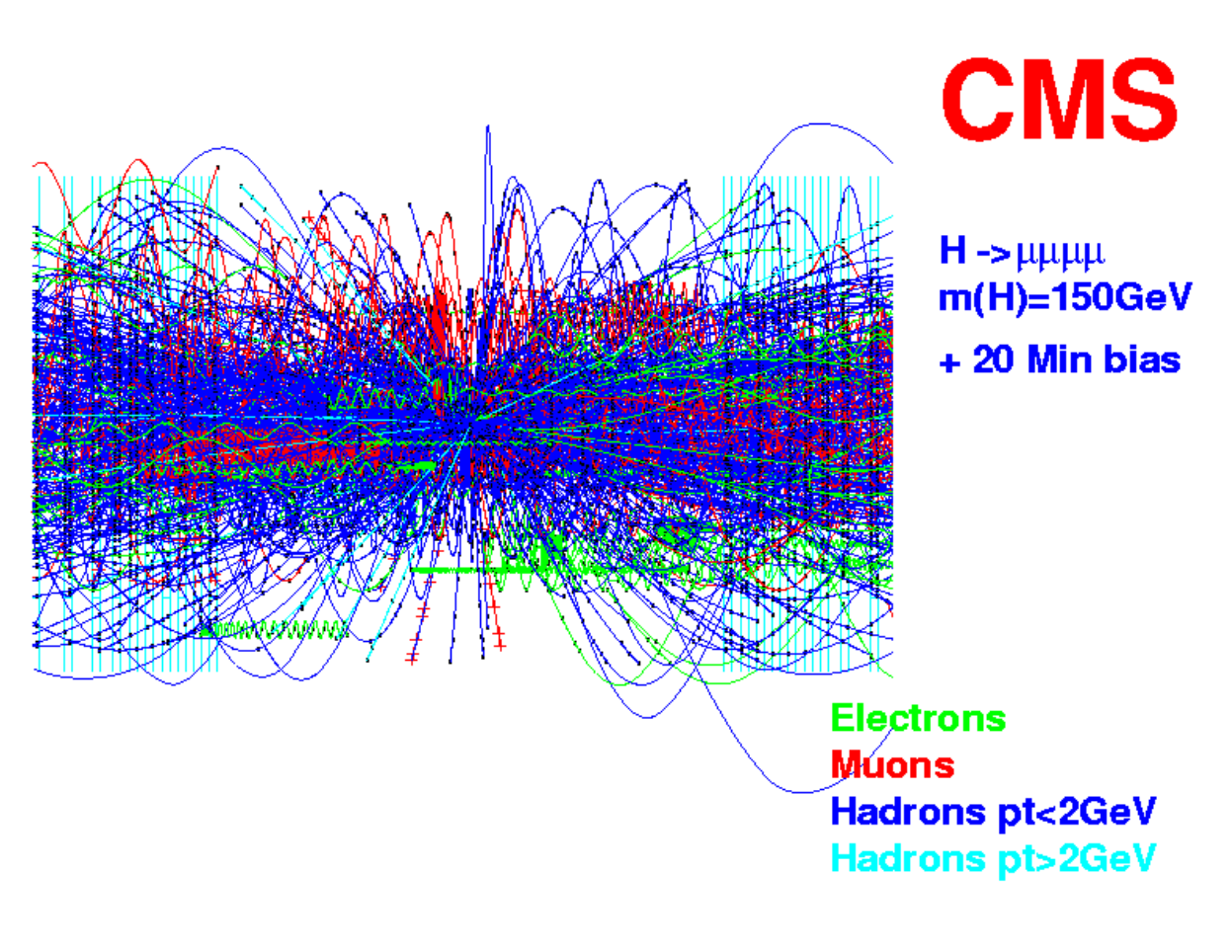


Peso = 12.500 t Diametro = 15 m Lunghezza = 21.6 m

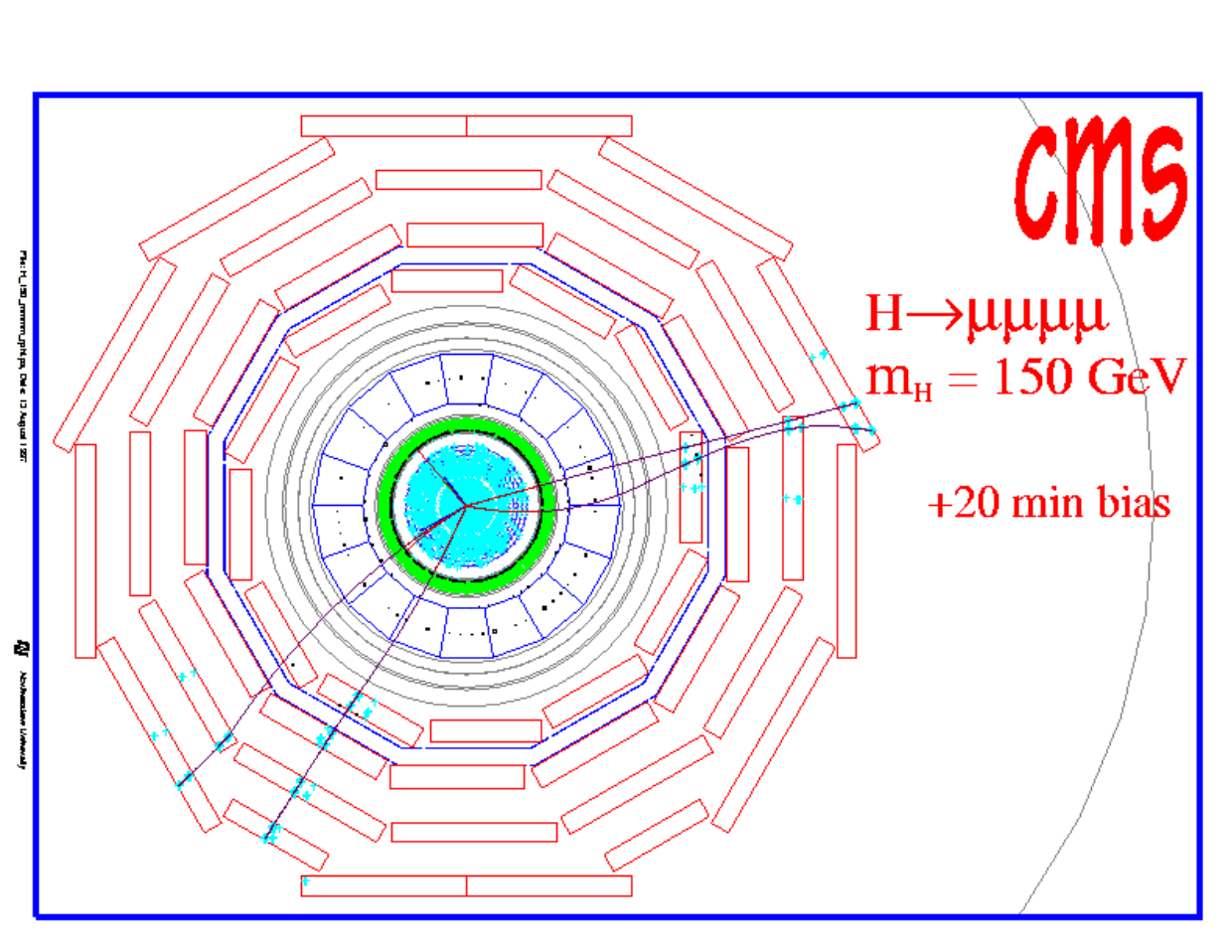
Evento con un Higgs in CMS tracker



Evento con un Higgs in CMS tracker



Evento con un Higgs in CMS Drift Chambers



Il Sistema Muonico di CMS

Il Sistema di rivelatori di Muoni e' integrato nel giogo di ritorno del campo magnetico solenoidale.
La risoluzione del momento e': ~ 10 % solo sistema muonico (limitato dalla diffusione multipla) si riduce a ~ 2 % insieme ai rivelatori di tracciamento centrali.

Nella regione Barrel vi sono 4 stazioni equipaggiate con:

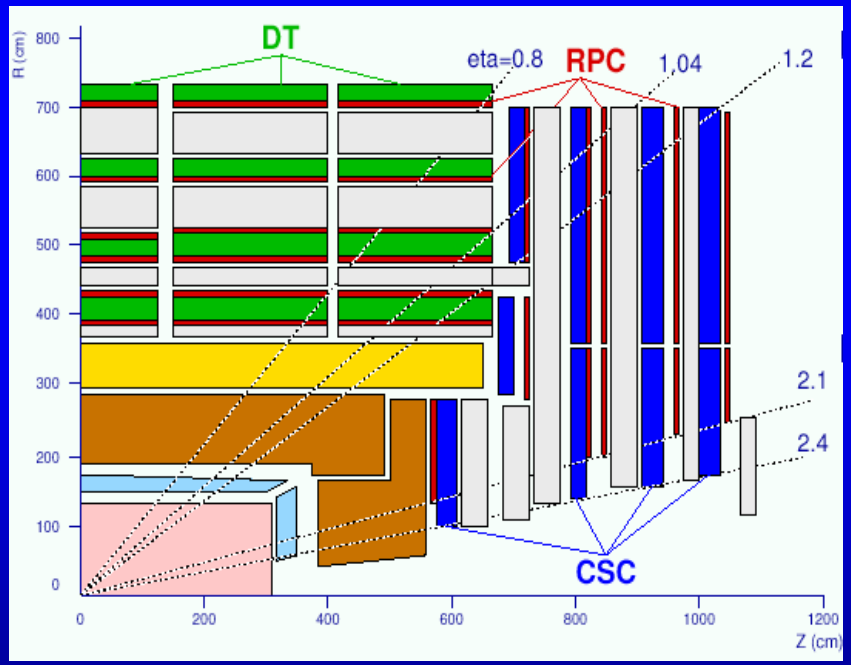
Camere a Deriva -> misura della traccia/momento, trigger

RPC -> trigger

Nella regione End cap vi sono 4 stazioni equipaggiate con:

Cathode Strip Chambers -> misura della traccia/momento, trigger

RPC -> trigger

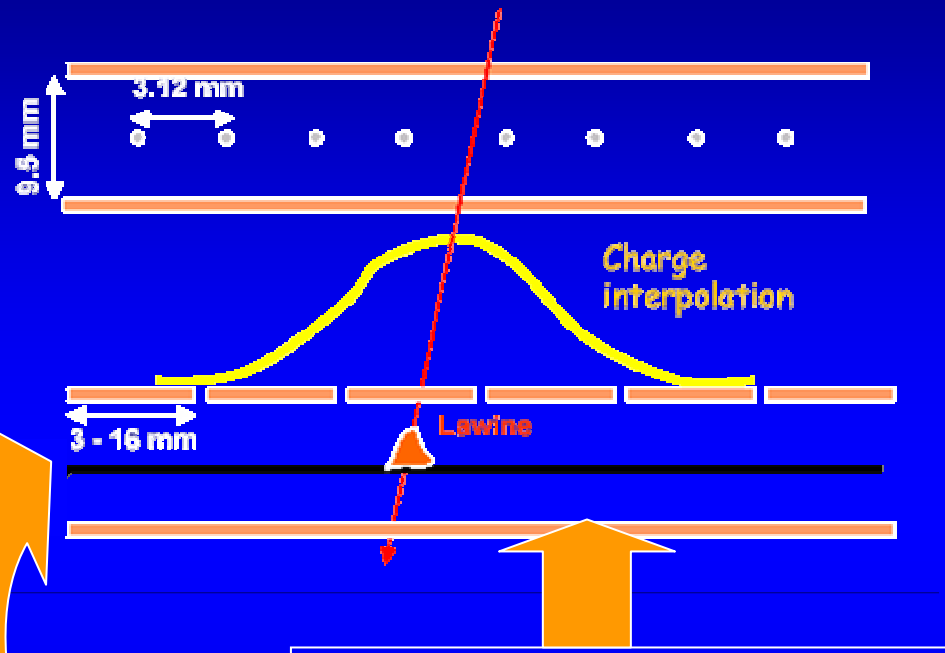


Identificazione dei Muoni in CMS

L'identificazione e' assicurata dal grande spessore di materiale di fronte al sistema muonico (10 lunghezze di interazione alla prima stazione di mu + altre 10 lunghezze fino all'ultima stazione).

L'identificazione e' effettuata costruendo dei segmenti di traccia in almeno 2 delle 4 stazioni dei muoni.
La presenza di stazioni multiple permette inoltre di controllare gli sciami adronici.

CSC in CMS

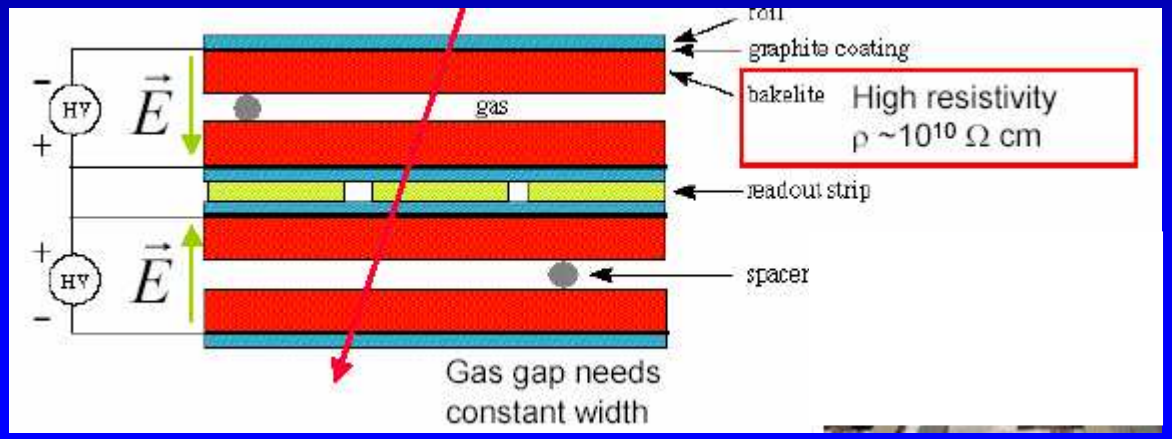


Strip del Catodo:
Risoluzione spaziale < 100 μm
Risoluzione temporale ~ 100 ns

Gas:
$Ar/CO_2/CF_4$ = 30/50/20 %
6 strati di CSC per camera

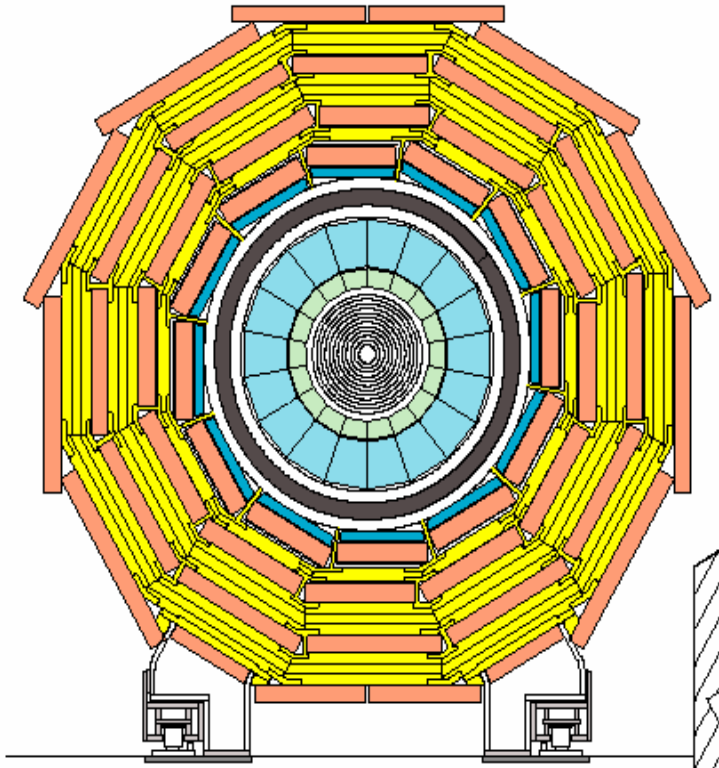
Fili anodici:
Risoluzione spaziale ~ mm
Risoluzione temporale ~ 4 ns

RPC in CMS



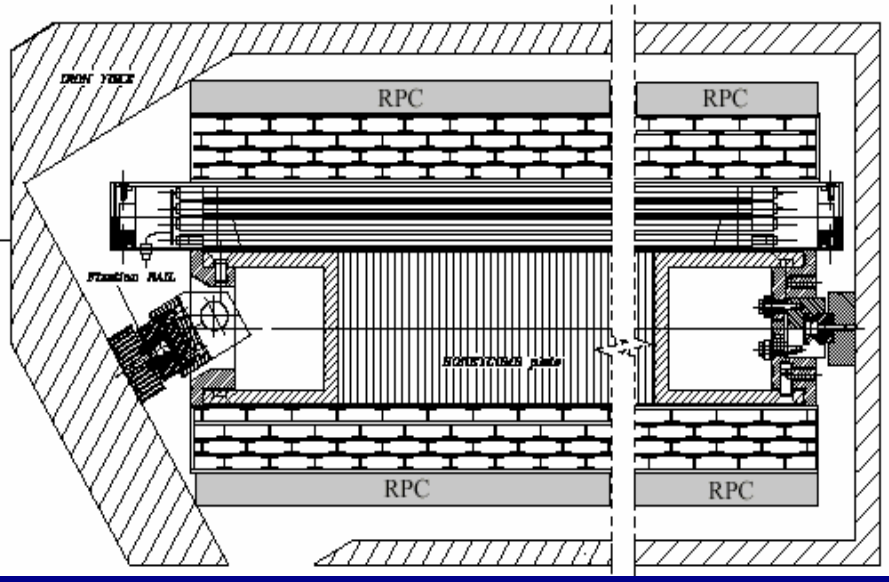
Guadagno ~ 10^7 (avalanche mode)
Risoluzione Temporale < 5ns
Risoluzione spaziale ~ mm (larghezza strip)
Frequenza di eventi rivelabili <1kHz/cm^2
Probabilita' di scarica < 1%
Gas 95% $C_2H_2F_4$, 5% I-$C_4H_{10}SF_6$

Camere a Deriva in CMS



- MB1,2,3= 8 ϕ-layers
  + 4 θ-layers
- MB4= 8 ϕ-layers

- 250 chambers
- 192 000 channels

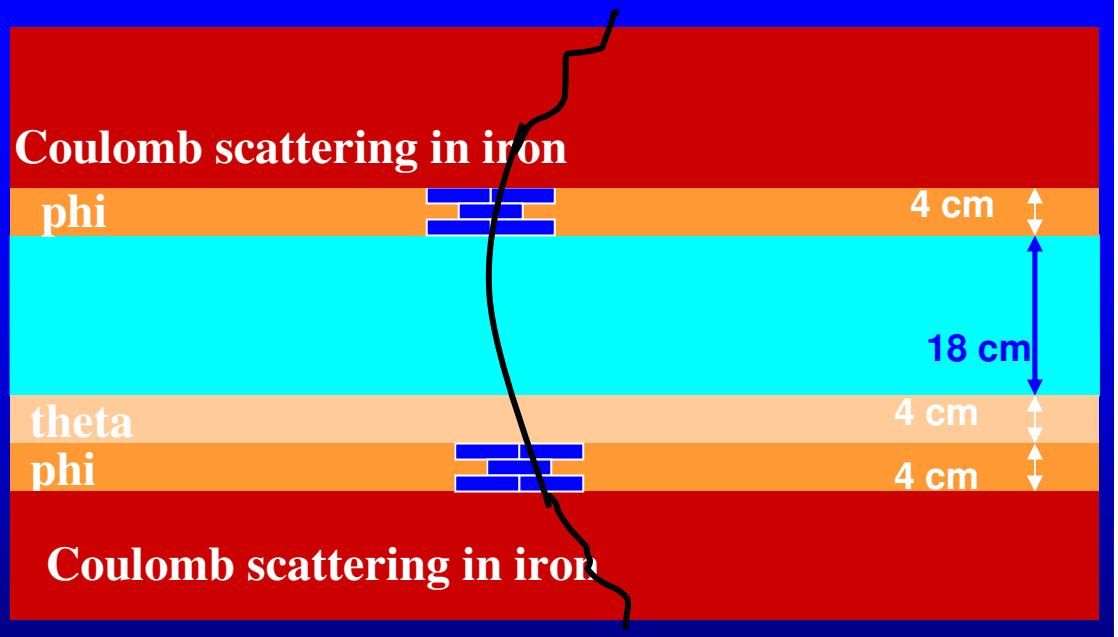


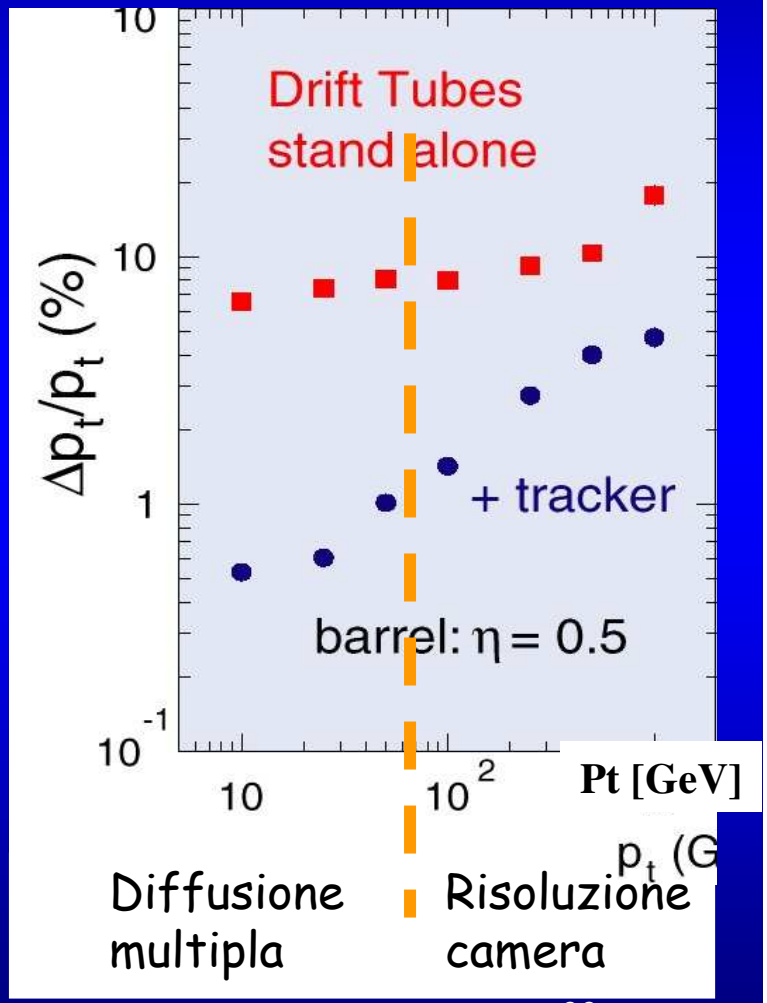
- wire pitch = 4.2 cm
- max. drift time = 380 ns

Misura del Momento (trasverso) con le Camere a Deriva in CMS

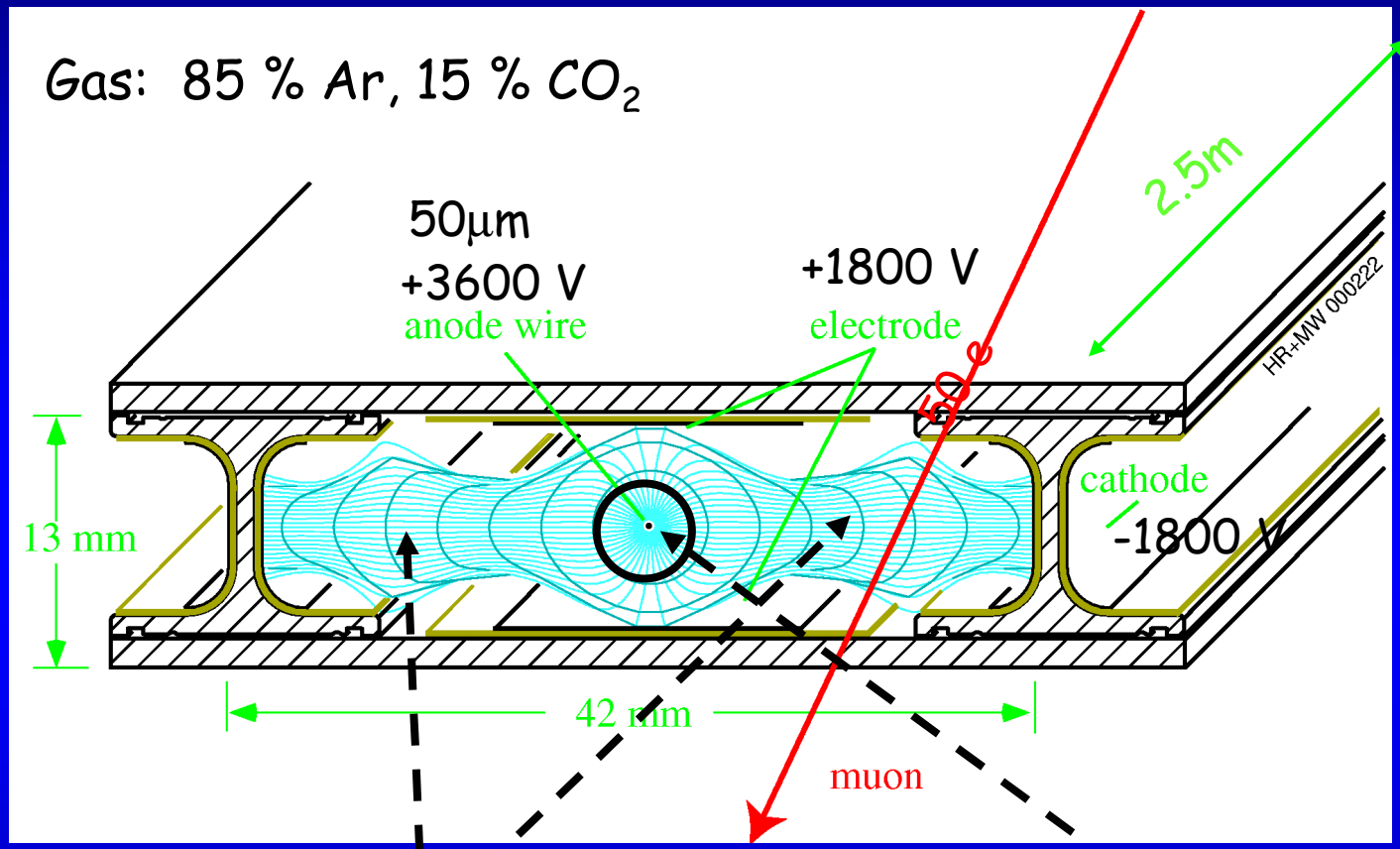
Misura delle coordinate +
puntamento al vertice +
campo magnetico =

Risoluzione in momento ~10 %
Risoluzione spaziale/camera ~100 μm





La Cella di Deriva



Regione di deriva

E ~ 2 kV/cm ~ const

v = 5.7 cm / μs ~ const

Risoluzione spaziale/ cella ~ 250 μm

Amplificazione ~ 10^5

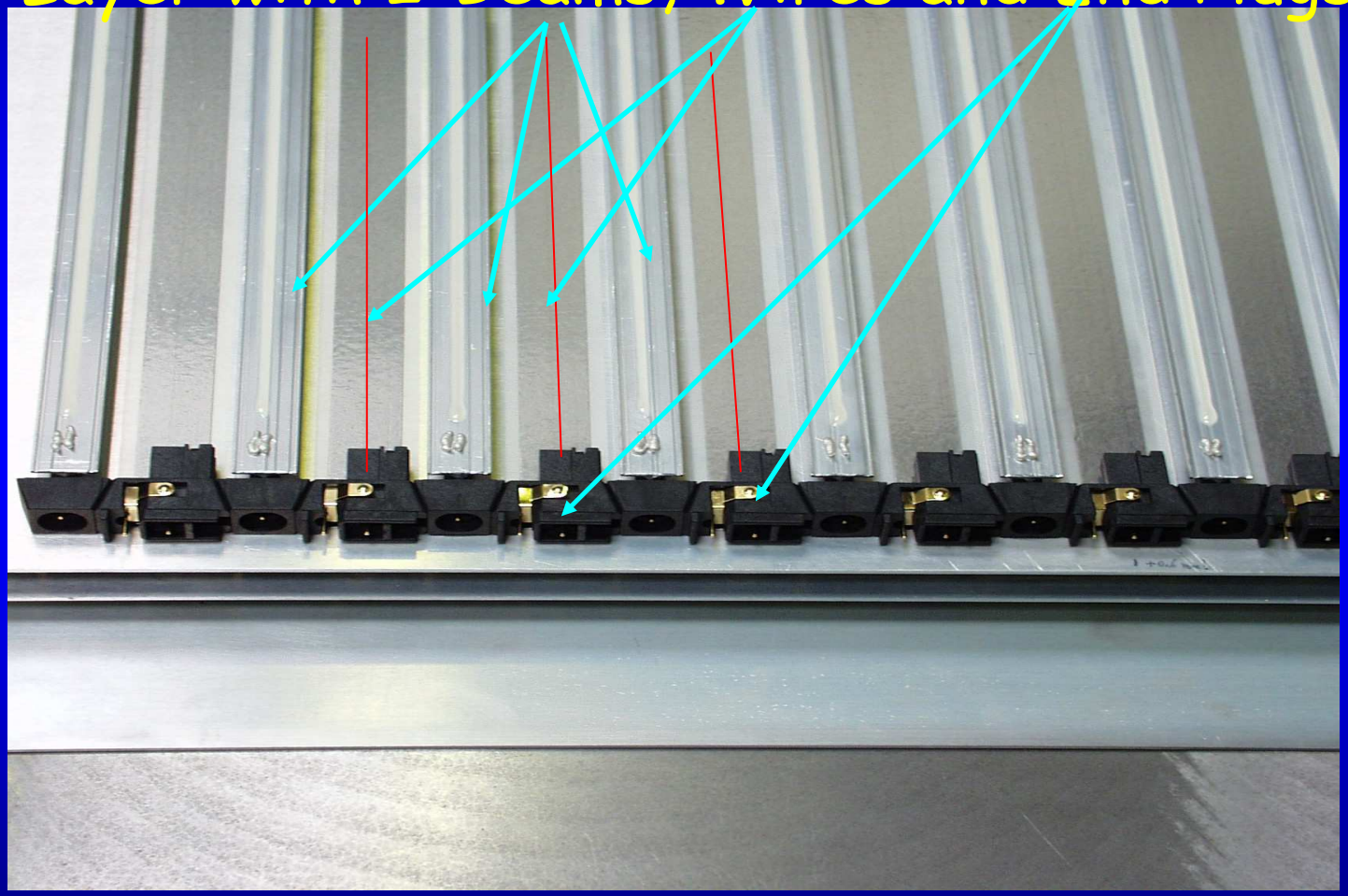
E ~ 1/r (~150 kV/cm)

Carica raccolta ~ 500 fC

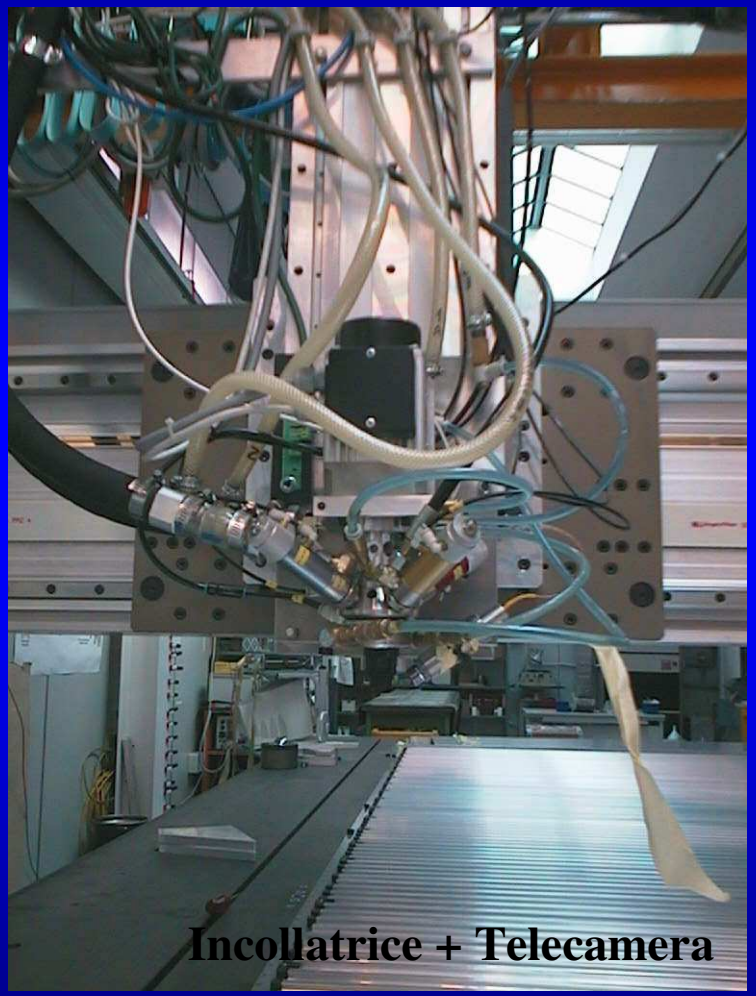
Siti di costruzione delle Camere a Deriva di CMS

Costruzione di Camere a Deriva di CMS

Layer with I-Beams, Wires and End Plugs



Costruzione delle Camere a Deriva a Torino



Giogo del Campo Magnetico
Installazione della prima ruota

Installazione delle Camere a Deriva in CMS

Sintesi e Conclusioni

- Le caratteristiche principali dei Sistemi di Rivelatori di Muoni si basano sull'identificazione dei Muoni (assorbitori), sulla misura della traiettoria e del momento (campo magnetico), e sulla misura del tempo di passaggio del Muone.
- I principi di funzionamento dei rivelatori a gas e a fili sono basati sulla scelta del gas e del guadagno del segnale.
- I Muoni sono un segnale prezioso nella ricerca di nuove particelle nei prossimi esperimenti al LHC.
- I Sistemi Muonici al LHC saranno tra i piu' grandi costruiti ad oggi ed anche i piu' complessi.
- Le Camere a Deriva per l'eperimento CMS sono costruite anche a Torino utilizzando strumentazioni e metodi propri di una produzione su larga scala.

L'inizio della presa dati al LHC e' prevista in aprile 2007 !

Rivelatori a scintillazione

I rivelatori a scintillazione sono formati da un materiale scintillante accoppiato otticamente ad un fotomoltiplicatore o a un fotodiodo.

Sollecitati da un'azione esterna (come luce, calore, radiazioni), assorbono e riemettono energia sotto forma di luce visibile

Le scintillazioni prodotte vengono amplificate da fotomoltiplicatori che convertono la luce in segnale elettrico dando informazioni sulla radiazione incidente.

Utilizzati nei trigger di raggi cosmici nei tests dei rivelatori in laboratorio.

Sono utilizzati negli esperimenti di alte energie prima e dopo gli assorbitori.

Per l'identificazione/trigger dei Muoni, piu' raramente per la misura del momento.

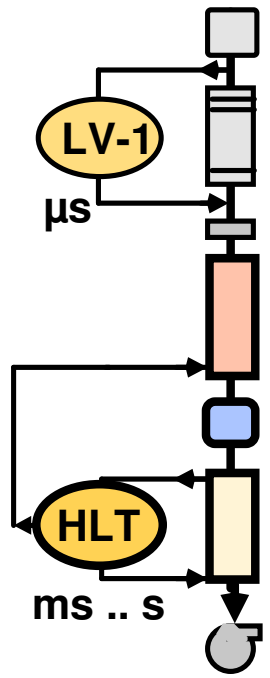
I principali parametri dei contatori a scintillazione:

- **very fast σt ~1ns**
- easy to make of any size
- **coordinate resolution is σx>1mm**
- expensive /m^2

Trigger

Come estraiamo il segnale che ci interessa (es. Higgs) e come riduciamo la quantita' di dati prodotti in modo che sia analizzbile ? -> Trigger

Sperimentalmente abbiamo bisogno di rivelatori veloci
(ottima risoluzione temporale < 20 ns)
Se vogliamo costruire un trigger per i Muoni storicamente si sono sempre utilizzati gli scintillatori.
Oggi all'LHC per il trigger di Muoni si usano le Resistive Plate Chambers.



40 MHz

10^5 Hz

1000 Gb/s

10^2 Hz