

Rivelatori di muoni

Laura Perasso
I.N.F.N.

Sommario:

1. Introduzione:
 - cosa sono i muoni
 - dove sono i muoni
 - perché li vogliamo rivelare
2. A cosa servono i rivelatori di muoni
3. Principio di funzionamento (come si rivelano i muoni ??)
4. Risoluzione nella misura del momento e risoluzione spaziale
5. Esempi di “*tracking detectors*”
6. Esempi di magneti
7. Esempi di rivelatori di muoni:
 - Cherenkov
 - spettrometri
8. Lettura segnale
9. Calibrazioni
10. Controllo stabilità

1.1- Cosa sono i muoni ?

Il leptone μ e' stato scoperto nei raggi cosmici da C.D. Anderson, S.H. Neddermeyer et al. nel 1936 e per 11 anni (fino al 1947, anno della scoperta del mesone π) si e' pensato che fosse la particella postulata da Yukawa nel 1935 come quanto del campo delle forze nucleari.

Spin = 1/2

Carica + / -

Massa = $105.6583692 \pm 0.0000094$ MeV [PDG 2005] ($\sim 200 m_e$)

$\mu^- \mu^+ e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ 100 % per interazione *debole*

Vita media = $2.19703 \pm 0.00004 \cdot 10^{-6}$ s $\sim 2 \mu$ s !!

E' un leptone, quindi **non** e' soggetto all'interazione forte:

!! e' la particella carica piu' penetrante !!

1.2 - Dove sono i muoni ??

I muoni abbondano negli acceleratori;

□ □ dal decadimento del π ($\pi^+ \rightarrow \pi^+ \mu^-$) formano l'“ *alone del fascio*”, ed accompagnano i fasci di particelle a cui siamo interessati:

=> con $0.57 p_\mu < p_\pi < 1.0 p_\pi$, con il picco a circa l'85%
del momento del π
estensione anche $2 \times 2 \text{ m}^2$

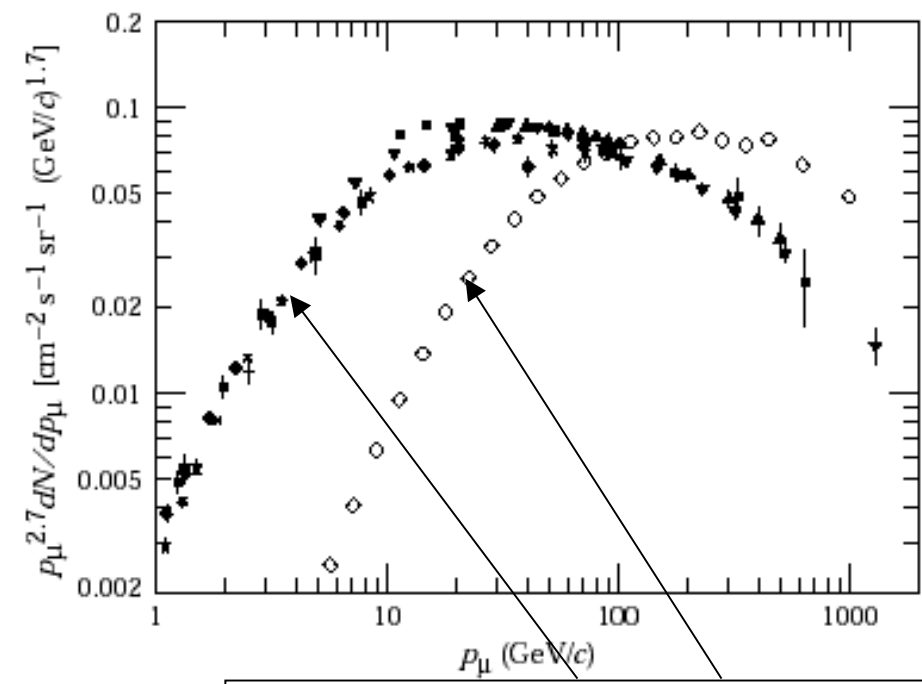
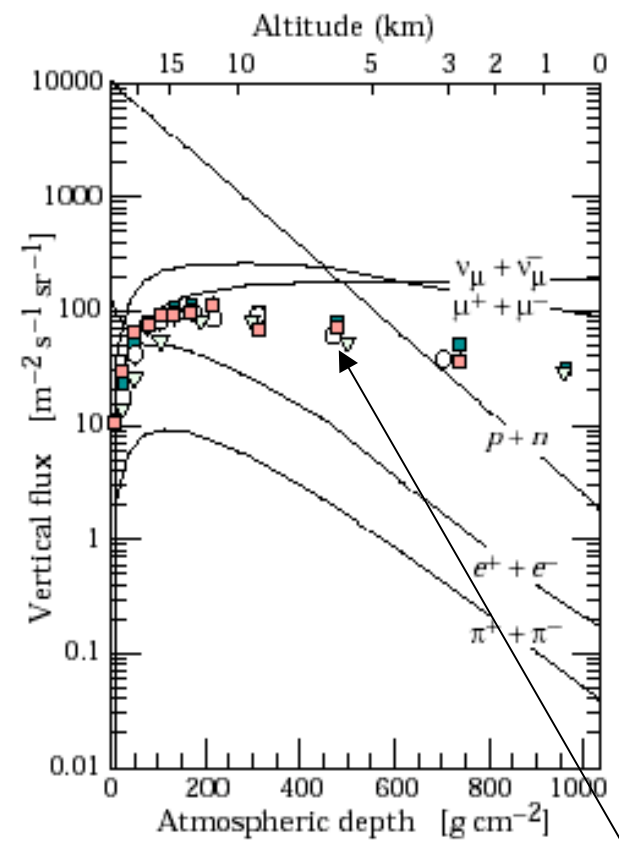
=> □ ad alto p , dal decadimento diretto di particelle ad alta massa: D, B, Z, W , ecc..

Possono essere:

- fondo da eliminare
- usati per calibrare e monitorare molti rivelatori (non solo i rivelatori a □)
- usati come segnale (trigger) di un evento importante da studiare
- ***parte di un decadimento o interazione da studiare !!***

I muoni sono le particelle cariche piu' abbondanti nei **raggi cosmici** al livello del mare: sono prodotti nell'alta atmosfera dal decadimento dei $\pi^0 \rightarrow \pi^\pm \pi^\pm$

$$\Phi_{\text{tot}}(E_\mu > 1 \text{ GeV}) \sim 400 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}; \quad \Phi_{\text{vert}} \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}; \quad \langle E_\mu \rangle \sim 4 \text{ GeV}$$



Spettro muoni a $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 75^\circ$ (misurati)

Linee = flussi verticali calcolati

Misure di flussi verticali di μ^\pm con $E_\mu > 1 \text{ GeV}$

$E_\mu = 2.4 \text{ GeV}$ decay length $\sim 15 \text{ km}$
 con ionizzazione $\Rightarrow 8.7 \text{ km}$

1.3 - Perché' vogliamo rivelare i muoni (agli acceleratori) ??

Per la fisica !!

- Particelle "importanti" hanno alcuni decadimenti "puliti" con uno o due μ , facilmente identificabili:

$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (\text{BR} = 5.88 \%)$$

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (\text{BR} = 3.366 \%)$$

Trigger : 2 μ

{ μ di carica opposta
 μ ad alto p_μ



$$W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu \quad (\text{BR} = 10.57 \%)$$

Trigger:

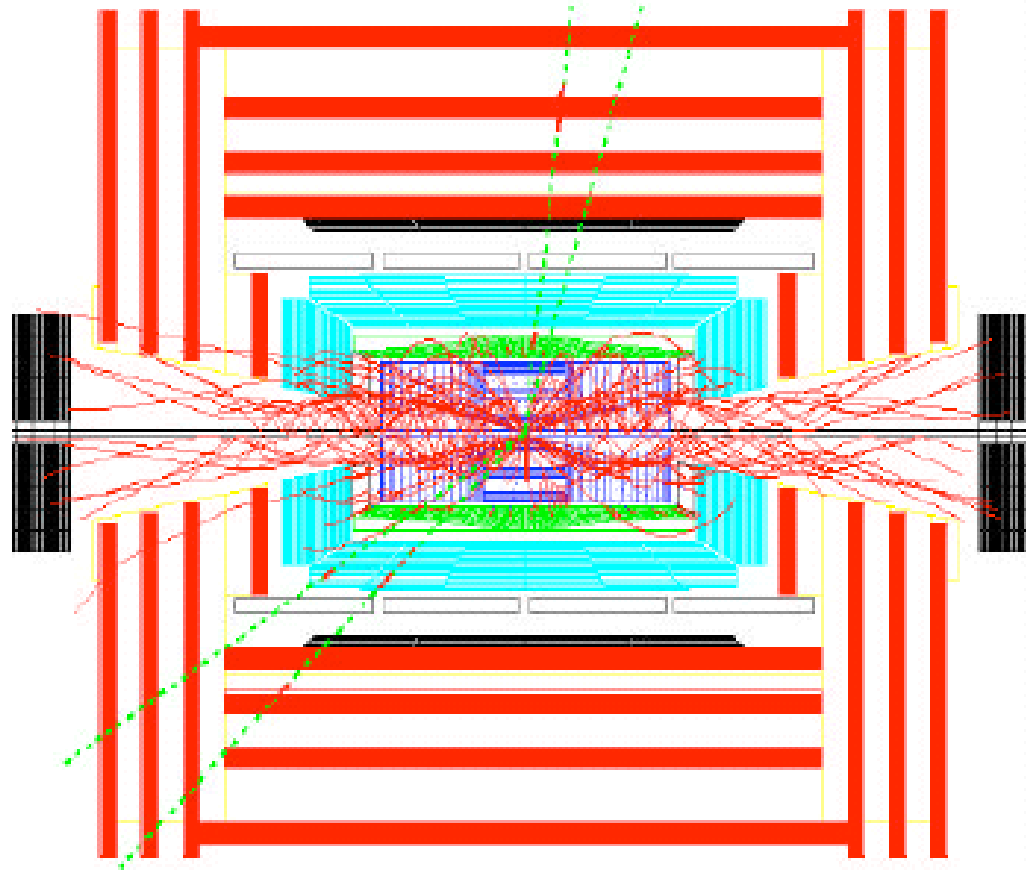
{ - un μ ad alto p_μ
 - alto valore di E_μ mancante (dovuta al ν)

- Decadimenti SemiLeptonici: importanti per determinare i valori della matrice di CKM per es.: $|V_{cs}|$ dai decadimenti SL della D; $|V_{cb}|$ dai dec. SL della B,..

.... e i muoni sono (piu') "facili" da rivelare ?!?!?!?

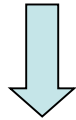
Per esempio il decadimento: Higgs \rightarrow 4 muoni in CMS

Misurando il momento (e la massa) delle particelle di decadimento (i 4 μ), posso calcolare la massa della particella d'origine (l'Higgs)



2 - A cosa servono i rivelatori di muoni ??

Si usano per:



- identificare i muoni
- misurarne la posizione (con o senza campo magnetico)
- misurarne il momento (con campo magnetico)
- segnalare la presenza di muoni nell'evento :trigger di muoni

Serve:

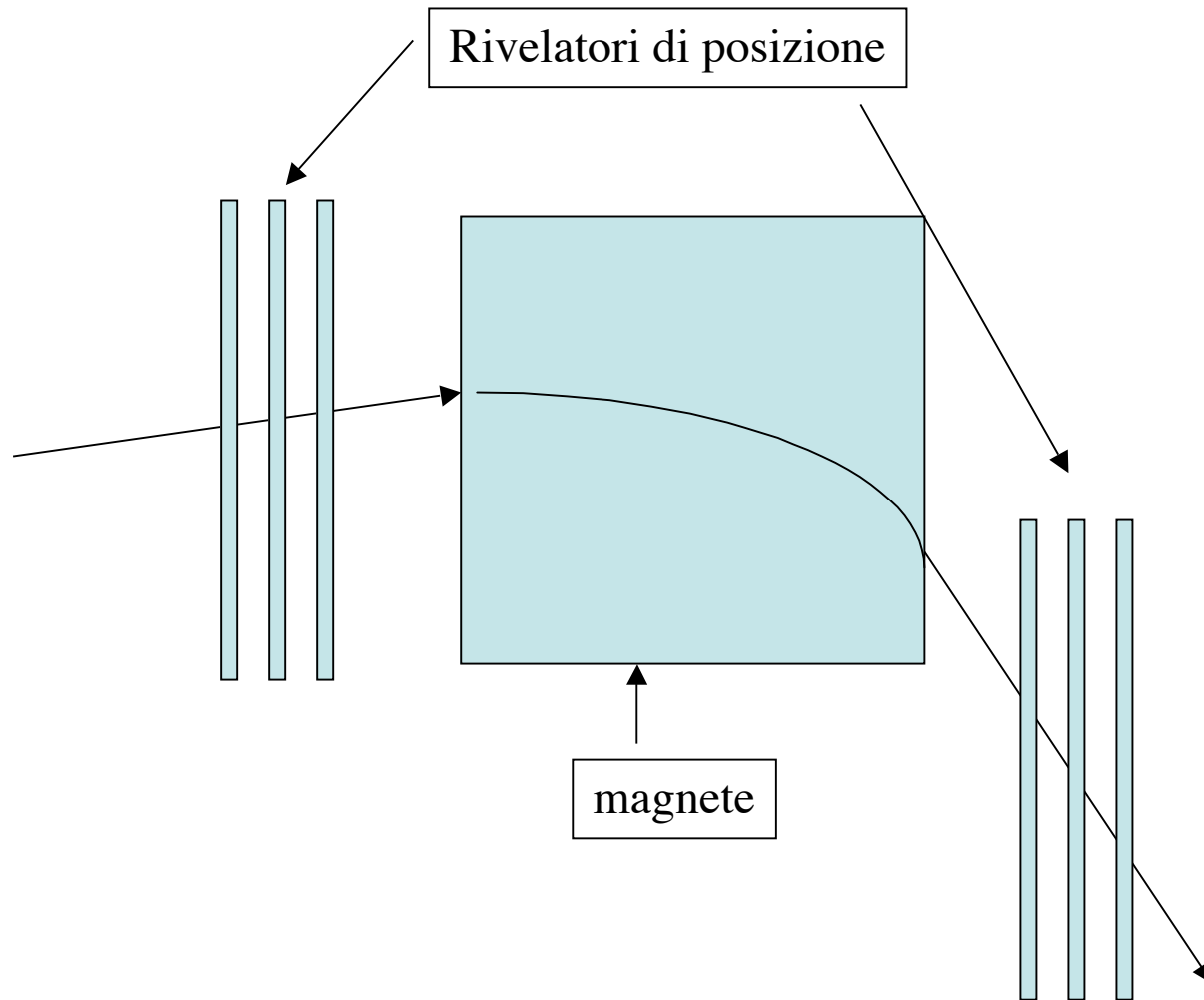


- ==> **efficienza di ID, ermeticita'**
- ==> **risoluzione spaziale**
- ==> **risoluzione \vec{p}**

Problema : grosse dimensioni dei rivelatori a muoni => tanti canali di lettura => alto costo !!

Se si misura anche il momento, l'insieme di magnete/i e rivelatori di posizione si chiama
 “ **spettrometro a muoni** ” \Longrightarrow

Esempio di “spettrometro a muoni”:



Identificazione dei muoni:

- per □ di alcuni GeV si misura la loro velocità (tempo di volo (*TOF*) , Cherekov, ...) ed il loro momento e si verifica il valore della massa:

$$m_0 = p/c \sqrt{1 - \beta^2} \stackrel{?}{=} m_\mu$$

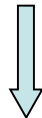
Inoltre si verificano i modi di decadimento e la vita media (ad AE, i □ si possono considerare stabili)

- per □ di alta energia (> alcuni GeV): si può assumere che, se una particella e' stabile

attraversa *un certo spessore di assorbitore* (o ha attraversato tutti i rivelatori precedenti)

subendo *una piccola deflessione*

Di quanto ??

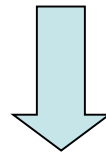


questa e' un muone

3 - Principio di funzionamento (o come si rivelano i muoni ?)

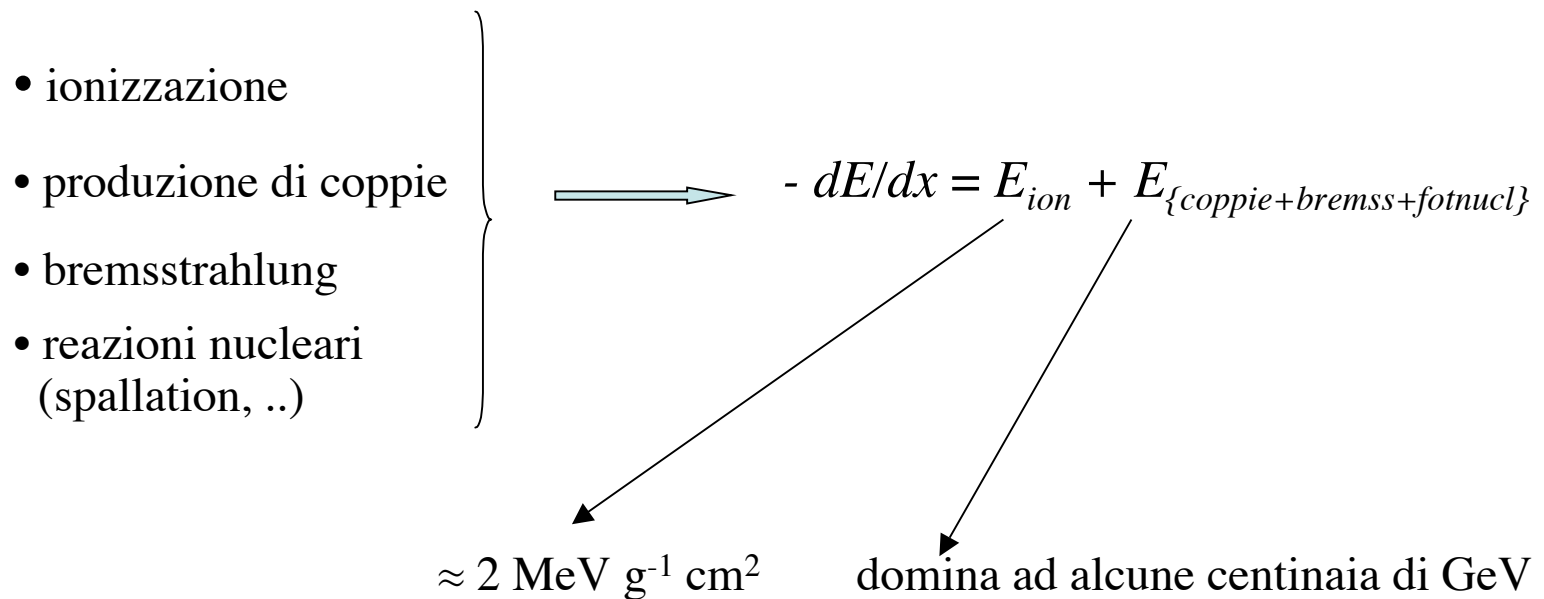
*Cosa succede quando un muone passa attraverso la materia
(di un rivelatore o altro) ??*

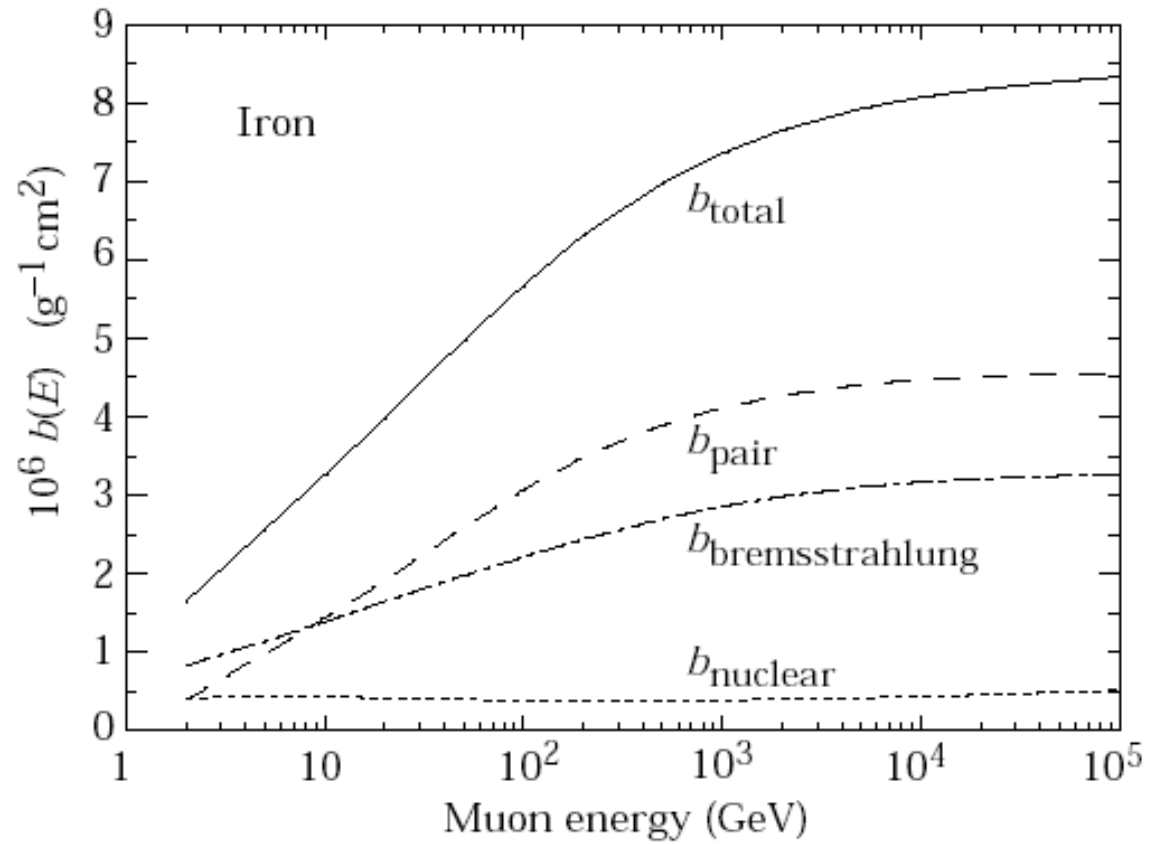
→ Quali sono i processi fisici che ci permettono di verificarne il passaggio e misurarne le caratteristiche (ex: massa, velocità,..) ??



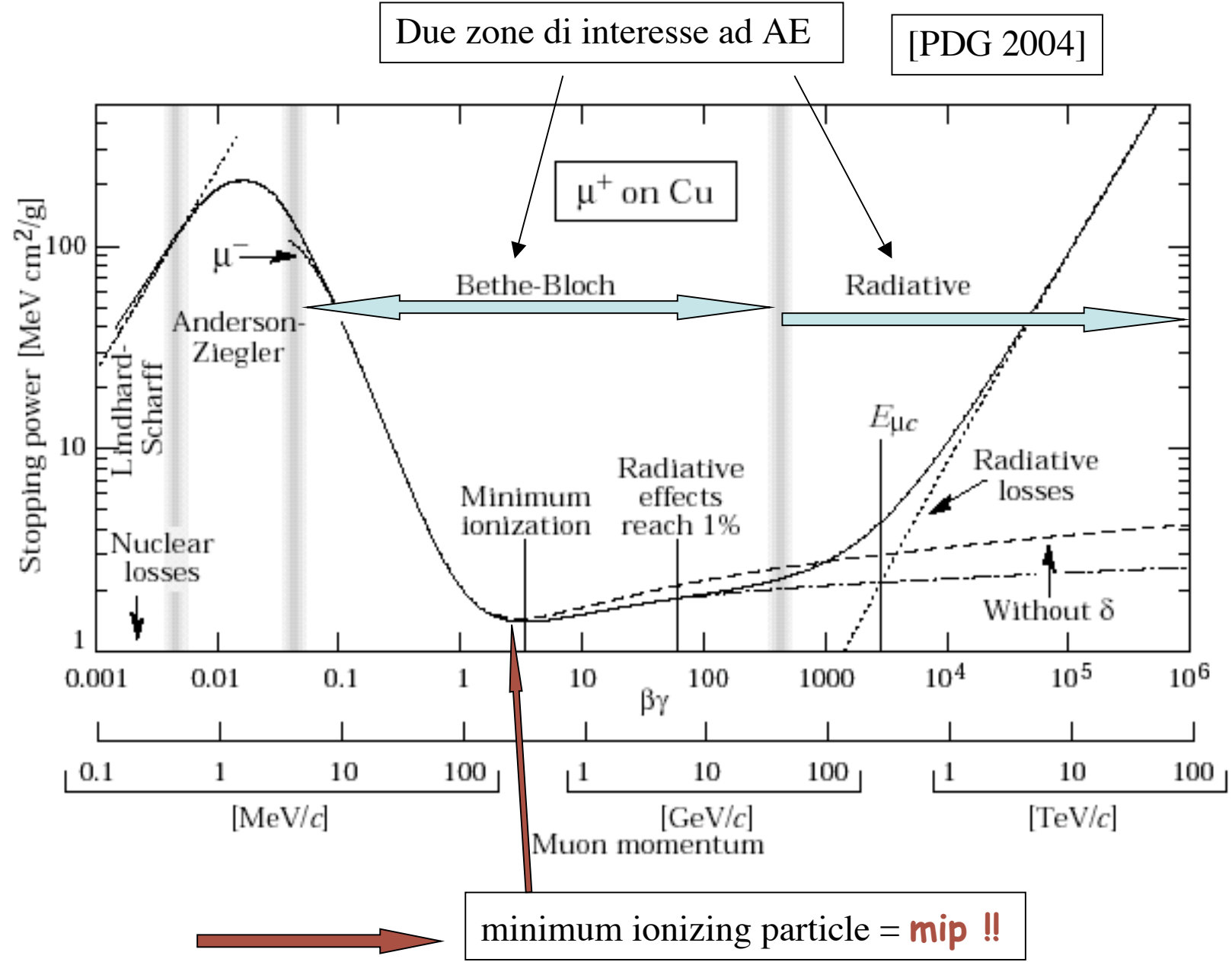
- a) Perdita di energia $\Delta E/dx$
- b) Effetto Cherenkov

a) - La perdita di energia dei muoni avviene per interazioni elettromagnetiche o reazioni nucleari:





[Fig 27-19 PDG 2000]



Ad Alte Energie, a seconda dell'energia dei muoni, due fenomeni ben distinti sono:

- **ionizzazione :**

per muoni con **$E \leq 200 \text{ GeV}$** :

=> la dE/dx dei muoni e' dovuta soprattutto **a ionizzazione**,

=> e' descritta *dall'equazione di Bethe-Bloch* [PDG 2004] \Longrightarrow

=> e vale:

$$\Rightarrow dE/dx \approx 2\text{MeV g}^{-1} \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow 1.4 \text{ GeV /m di Fe}$$

240 GeV/km nell'atmosfera

- **radiazione:**

per tutte le particelle cariche, **con $E \geq 200 \text{ GeV}$** :

□ la dE/dx da processi radiativi diventa piu' importante che la dE/dx per processi di ionizzazione

□ e questi processi radiativi sono quelli che dominano la dE/dx dei muoni energetici dei raggi cosmici o prodotti ai nuovi acceleratori

□ questi muoni si comportano e sciamano come gli elettroni \Longrightarrow

=> notevoli sono le "fluttuazioni di Landau" \Longrightarrow

=> problemi di segnali "*multipli*" \Longrightarrow

Equazione di Bethe-
Bloch [PDG2004]:

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]. \quad (27.1)$$

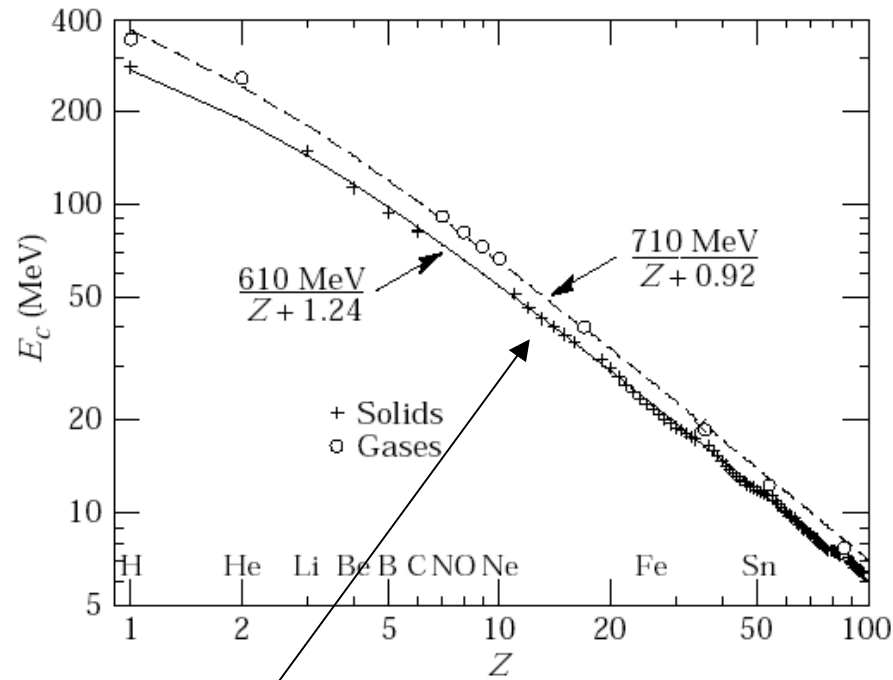
Here T_{\max} is the maximum kinetic energy which can be imparted to a free electron in a single collision, and the other variables are defined in Table 27.1. With K as defined in Table 27.1 and A in g mol^{-1} , the units are $\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$.

Symbol	Definition	Units or Value
α	Fine structure constant $(e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$	1/137.035 999 11(46)
M	Incident particle mass	MeV/c^2
E	Incident particle energy $\gamma M c^2$	MeV
T	Kinetic energy	MeV
$m_e c^2$	Electron mass $\times c^2$	0.510 998 918(44) MeV
r_e	Classical electron radius $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 325(28) fm
N_A	Avogadro's number	$6.022 1415(10) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ze	Charge of incident particle	
Z	Atomic number of absorber	
A	Atomic mass of absorber	g mol^{-1}
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	0.307 075 $\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
I	Mean excitation energy	eV (<i>Nota bene!</i>)
δ	Density effect correction to ionization energy loss	
$\hbar\omega_p$	Plasma energy $(\sqrt{4\pi N_e r_e^3} m_e c^2 / \alpha)$	$28.816 \sqrt{\rho(Z/A)} \text{ eV}^{(a)}$
N_e	Electron density	(units of r_e) $^{-3}$
w_j	Weight fraction of the j th element in a compound or mixture	
n_j	\propto number of j th kind of atoms in a compound or mixture	
—	$4\alpha r_e^2 N_A / A$	$(716.408 \text{ g cm}^{-2})^{-1}$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
X_0	Radiation length	g cm^{-2}
E_c	Critical energy for electrons	MeV
$E_{\mu c}$	Critical energy for muons	GeV
E_s	Scale energy $\sqrt{4\pi/\alpha} m_e c^2$	21.2052 MeV
R_M	Molière radius	g cm^{-2}

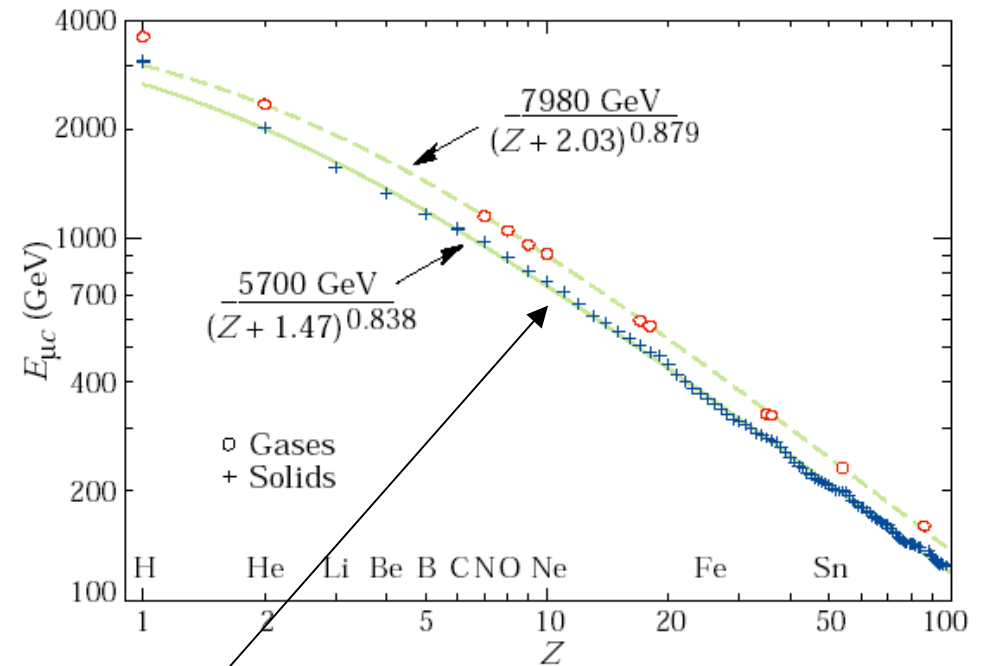
(a) For ρ in g cm^{-3} .

Si definisce **Energia critica** (E_c):

l'energia di una particella carica alla quale ΔE per ionizzazione = ΔE per radiazione

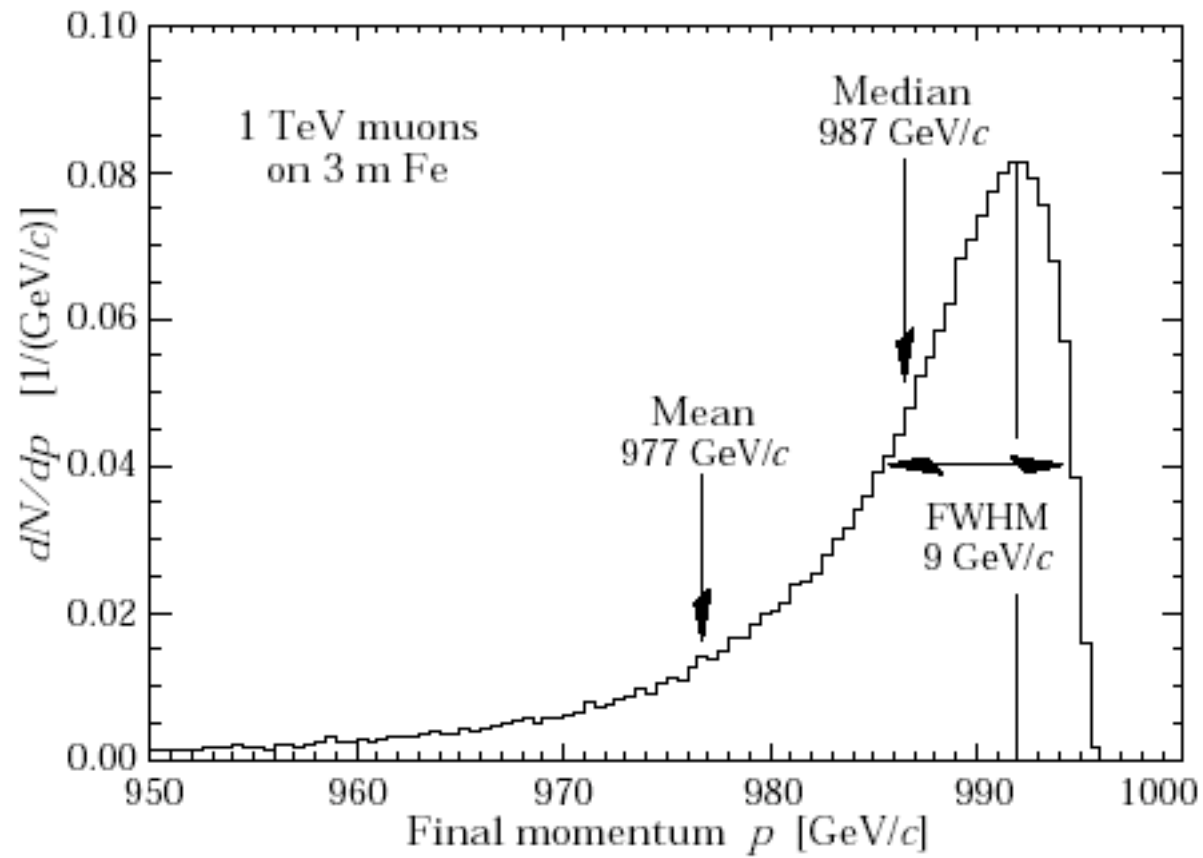


Per elettroni



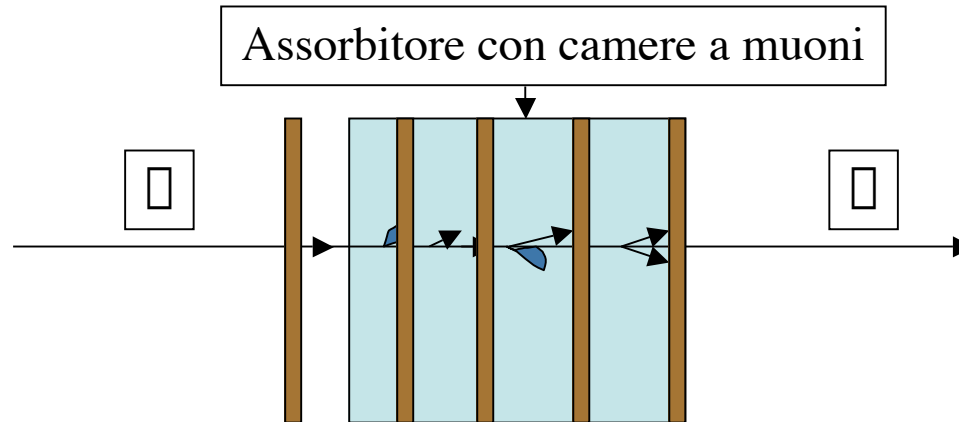
Per muoni

“Fluttuazioni di Landau”



Valori calcolati usando il programma MARS14 [PDG 2004]

Ad energie molto alte, $E_m \sim 500 \text{ GeV}$, i muoni iniziano a perdere energia a causa della radiazione, e la traccia dei muoni non è più bella pulita, ma è accompagnata da sciame e.m.:



Il problema principale è l'abbondanza di tracce lungo il percorso, che potrebbe causare una sovra-occupazione - a volte saturazione - dei canali dell'elettronica di lettura e potrebbe anche creare un'identificazione errata della traccia in uscita.

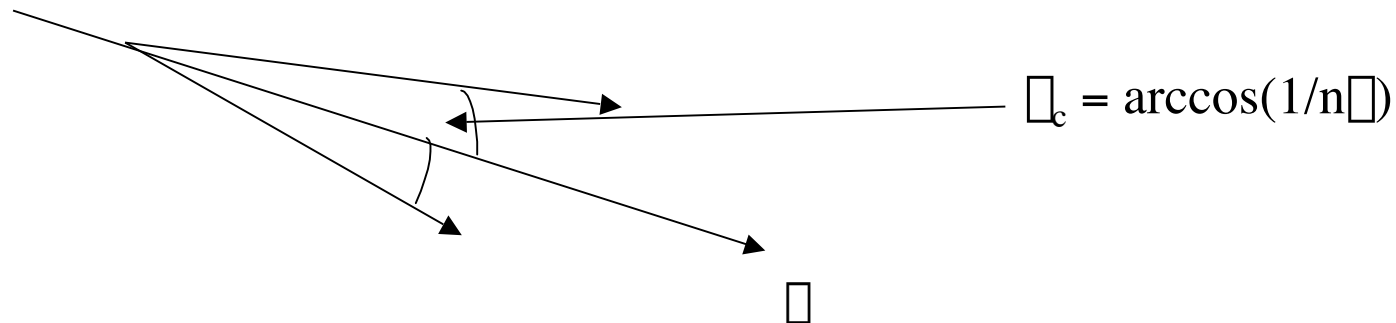
Per ridurre questo fondo occorre:

- aumentare il numero di piani di lettura
- lasciare spazi d'aria fra l'assorbitore e il rivelatore di tracce
- usare un'elettronica più veloce (*multi hit*)

b) - L'effetto Cherenkov dei muoni (e delle altre particelle cariche) avviene quando esse attraversano un mezzo nel quale la loro velocità è maggiore della velocità della luce in quel mezzo ($c_{mezzo} = c/n$):

$$V_{\mu} > c/n \Rightarrow \beta > 1/n \quad (n_{acqua} = 1.33)$$

Non c'è ~ perdita di energia, ma emissione di radiazione ad un angolo



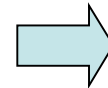
Il numero di fotoni emessi per unita' di cammino percorso (x [cm]) per una particella di carica ze per unita' di energia (E [eV]) dei fotoni emessi e':

$$\frac{d^2N}{dE dx} = \frac{\alpha z^2}{hc} \sin^2 \theta_c = \frac{\alpha^2 z^2}{r_e m_e c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(E)} \right)$$

$$\approx 370 \sin^2 \theta_c(E) \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-1} \quad (z = 1) ,$$

Esprimendo l'energia in lunghezza d'onda (λ):

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right)$$



Per esempio, nell'acqua ($n=1,33$) e per $300 < \lambda < 500 \text{ nm}$ un muone relativistico ($\beta \sim 1$) emette ~ 300 fotoni/cm

4 - *Risoluzione*

Importanti parametri dei rivelatori di muoni sono:

- I. probabilità di “*punchthrough*” adronico
- II. la risoluzione nella misura del *momento* (e della *posizione*)

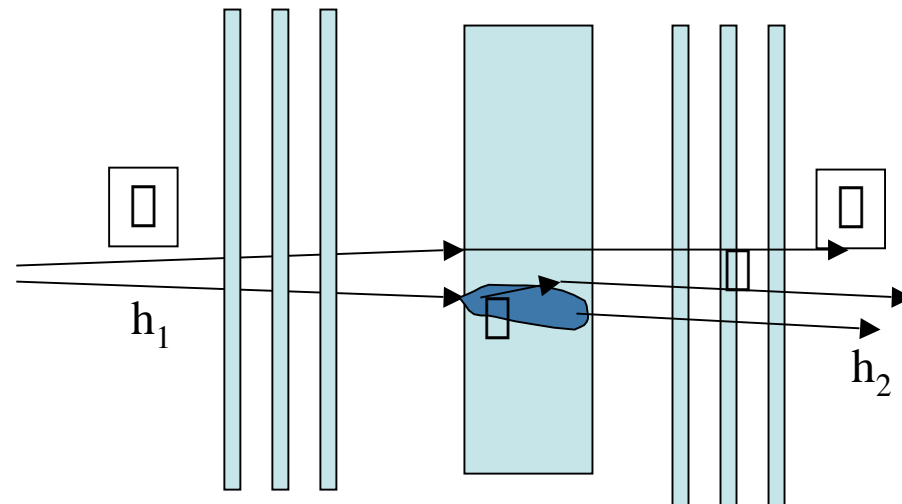
I: “Punchthrough” adronico

Gli adroni creano sciami negli assorbitori; se questi sono troppo sottili, alcune particelle dello sciame (adroni e/o π) possono uscire ed essere rivelate come π dai rivelatori di tracce.

\square Simulazioni MonteCarlo e misure su fascio sono usati per misurare questa probabilità.
Metodi per minimizzare questo

“Punchthrough” adronico e’ :

- \square porre rivelatori prima e dopo gli assorbitori (ES 2 vs 3 trks)
- \square misurare p prima e dopo gli assorbitori
- \square avere un’ottima granularita’ e risoluzione spaziale dei rivelatori di tracce



II: la risoluzione nella misura del momento:

Caso semplice: B costante e perpendicolare alla direzione della particella:

La traiettoria e' un cerchio di raggio r e $\Rightarrow p = q B r / c \Rightarrow p[\text{GeV}] = 0.3 B[\text{T}] r[\text{m}]$

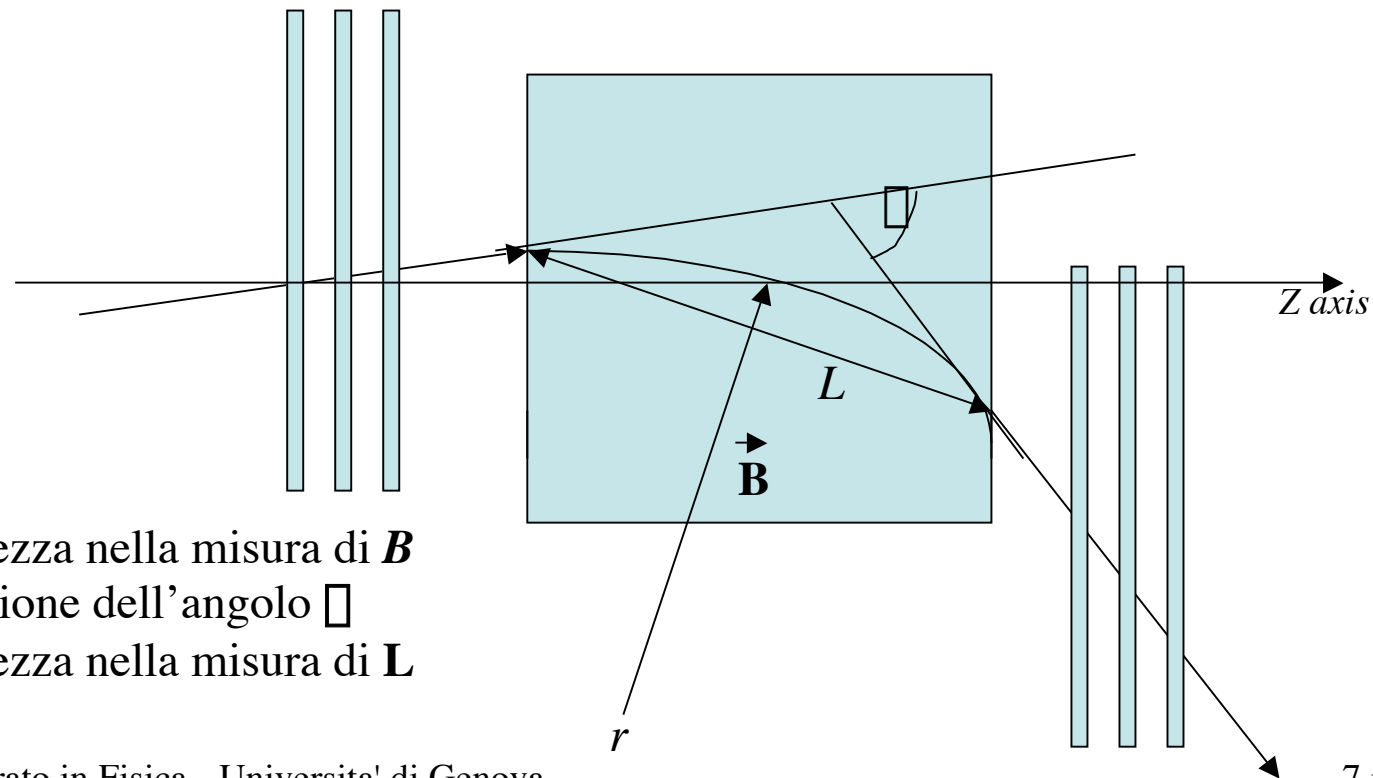
Passando da r a $L \Rightarrow$

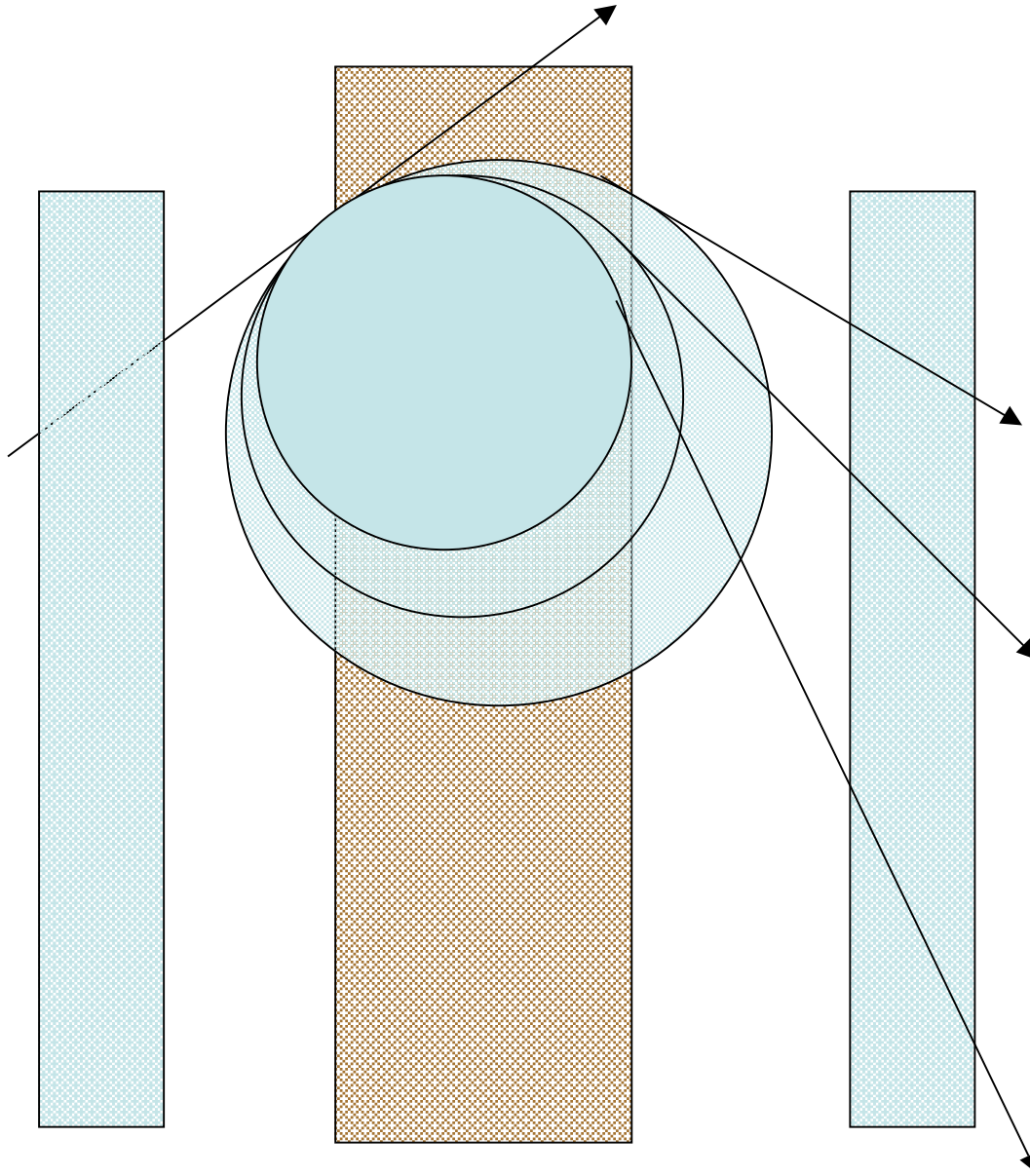
$$p[\text{GeV}/c] = (L/2 \sin \theta/2 B[\text{kG}] L) / 33 \text{ m} \Rightarrow p [\text{GeV}/c] = \frac{0.3 B [\text{T}] L [\text{m}]}{\theta [\text{rad}]}$$

$$\theta [\text{rad}] = 0.3 B [\text{T}] L [\text{m}] / p [\text{GeV}/c] \quad \Rightarrow \quad \theta|_{\text{bend}} \propto 1/p$$

$\theta|_p$ dipende:

- dall'accuratezza nella misura di B
- nella risoluzione dell'angolo θ
- nell'accuratezza nella misura di L

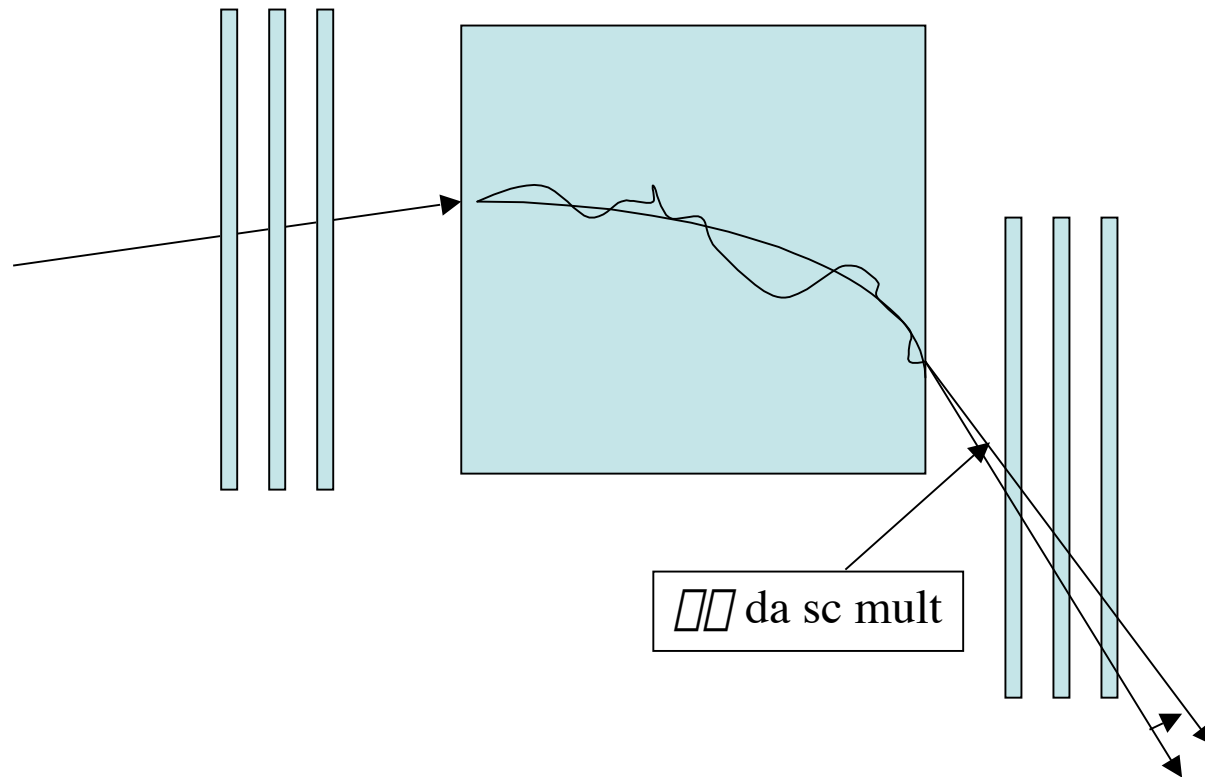




Cosa può peggiorare la risoluzione nella misura dell'angolo θ e di L , e quindi su p ??

- a) l'effetto dello "scattering multiplo"
- b) la *risoluzione spaziale* dei rivelatori di tracce

$$\longrightarrow (\theta_p)^2 = (\theta_{ms})^2 + (\theta_{res})^2$$



a) lo scattering multiplo (Δ_{ms})

Una particella carica che attraversa un mezzo, e' deflessa di *molti piccoli angoli* (dovuti all'interazione e.m.) e di *alcuni grandi angoli*.

Per i piccoli angoli di deflessione, la distribuzione degli angoli di deflessione e'
~ Gaussiana con il 98% degli angoli entro :

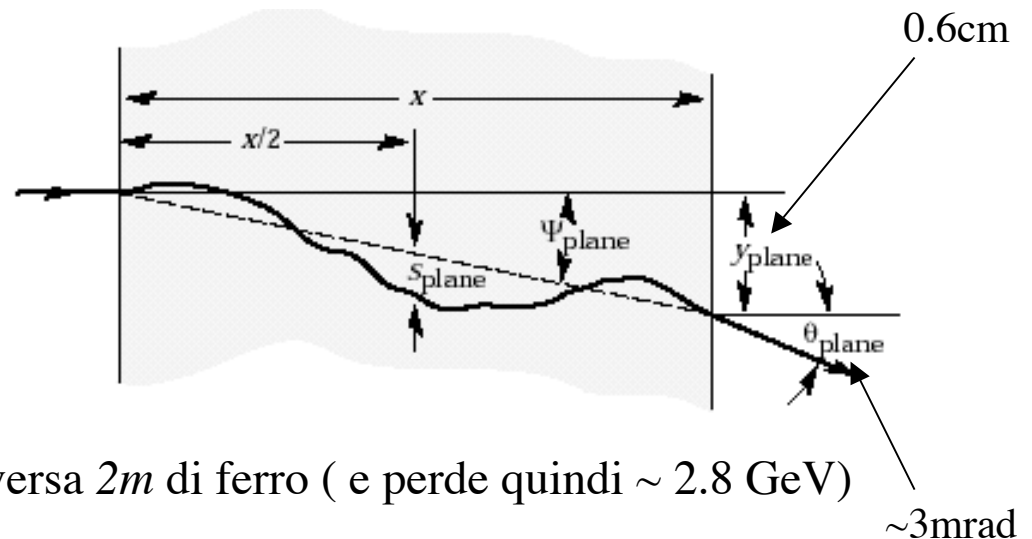
$$\Delta = \frac{(0.014 \text{ GeV}/c) z (x/X_0)^{1/2} A}{p[\text{Gev}]}$$

$$A = [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

$$X_0 = \text{rad. length}$$

[PDG 2004]

$$\Delta \mu 1/p$$



ES: Per un muone di $50 \text{ GeV}/c$ che attraversa $2m$ di ferro (e perde quindi $\sim 2.8 \text{ GeV}$)

$$\Delta = 2.98 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\Delta_y = x \text{ tg } \Delta = 0.6 \text{ cm}$$

=> Queste sono approssimazioni utili per calcolare gli angoli piccoli

=> Per calcoli più precisi, bisogna usare simulazioni Monte Carlo.

b) la risoluzione dei rivelatori di tracce (Δ_{res}):

- quanti piani, cioè quanti punti nello spazio, devo avere?
- quale risoluzione sul singolo punto devo avere ?

⇒ **Quale tipo di rivelatore devo costruire ??**

Si usa spesso una grandezza utile: la sagitta

$s = \text{sagitta}$

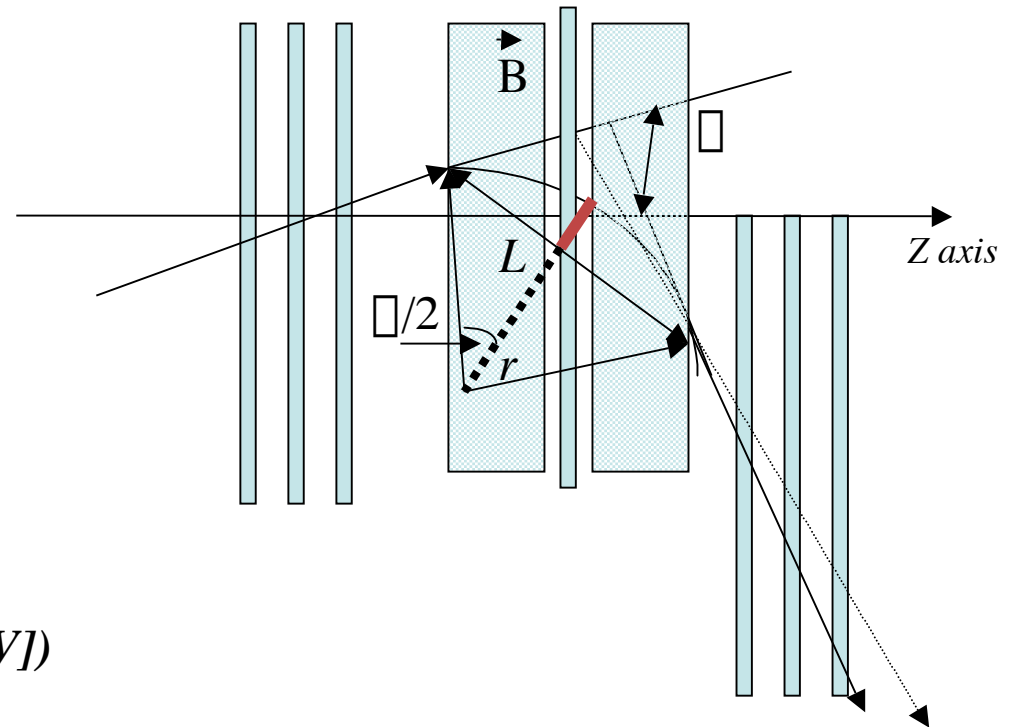
$$s = r - \sqrt{r^2 - L^2/4} \quad (L/2 = r \sin \Delta/2)$$

$$s = r (1 - \cos \Delta/2) = 2 r \sin^2 \Delta/4 \approx r \Delta^2 / 8$$

$$(\Delta = 2.828 \sqrt{s/r})$$

$$\begin{cases} \Delta [\text{rad}] = 0.3 B [T] L [m] / p [\text{GeV}/c] \\ r = p / 0.3 B \end{cases}$$

$$\Rightarrow s = 0.3 B [\text{Tesla}] L^2 [m] / (8 p [\text{GeV}])$$



Quanto vale Δ_s ??

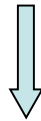
Se ho 3 punti (minimo!) :

$$s = x_2 - (x_1 + x_3)/2 = x_2 - x_1/2 - x_3/2$$

$$\Delta_s^2 = \Delta_{x_1}^2 (\partial s / \partial x_1)^2 + \Delta_{x_2}^2 (\partial s / \partial x_2)^2 + \Delta_{x_3}^2 (\partial s / \partial x_3)^2$$

$$\Delta_s^2 = \Delta_{x_2}^2 + 1/4 \Delta_{x_1}^2 + 1/4 \Delta_{x_3}^2$$

Se $\Delta_{x_1} = \Delta_{x_2} = \Delta_{x_3} = \Delta_x$



$$\Delta_s^2 = 4/4 \Delta_x^2 + 1/4 \Delta_x^2 + 1/4 \Delta_x^2 = 6/4 \Delta_x^2 = 3/2 \Delta_x^2$$

$$\Delta_s = \sqrt{3/2} \Delta_x$$

$$\Delta_s / s = \sqrt{3/2} \Delta_x [8 p / (0.3 B L^2)] = 32.6 \Delta_x p / B L^2 [m, \text{GeV}/c, T]$$

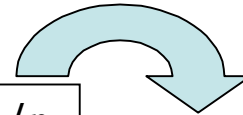
$$s = 0.3 B [\text{Tesla}] L^2 [\text{m}] / (8 p [\text{GeV}])$$



$$p = 0.3 B L^2 / 8 s \implies \Delta_p^2 = \Delta_s^2 [0.3 B L^2 / (8 s^2)]^2$$



$$\Delta_s / s = \Delta_p / p$$



Ecco perché si è introdotta la sagitta !!

$$\Delta_p / p = \Delta_s / s = 32.6 \Delta_x p / B L^2 [m, \text{GeV}/c, T]$$



$$\Delta_p / p \Big|_{res} \mu p$$

ES:

$$B = 1.5 \text{ T}$$

$$L = 0.8 \text{ m}$$

$$\Delta_x = 150 \mu\text{m}$$

$$\implies \Delta_p / p \Big|_{res} = \Delta_s / s = 5.1 \cdot 10^{-3} p$$

$$\text{se } p = 1 \text{ GeV}/c \implies \Delta_p \approx 0.5 \%$$

Questi sono conti molto approssimati !!!!

La realtà e' (naturalmente) molto più complicata !!!!

Per es: in CMS :

$$\frac{1}{pt} = \frac{-\frac{x}{c^2 a} - \frac{y}{bc^2} + \frac{px}{ac^2} + \frac{py}{bc^2} + \sqrt{\left(\frac{x}{c^2 a} + \frac{y}{bc^2} - \frac{px}{ac^2} - \frac{py}{bc^2}\right)^2 + 8(1-p^2)\left(\frac{x^2}{a^2 c^2} + \frac{y^2}{b^2 c^2} - 2\frac{pxy}{ac^2 bc^2}\right)}}{4-4p^2}$$

Come si può migliorare la risoluzione nella misura del momento?

$$(\Delta_p)^2 = (\Delta_{ms})^2 + (\Delta_{res})^2$$

Se si misurano $n > 3$ punti equidistanziati, misurati con la stessa risoluzione Δ_y

$$\Delta_p/p|_{res} = (720/(n+4))^{1/2} \Delta_y p / (0.3 B L^2) [m, GeV, T]$$

- Ridurre lo scattering multiplo:

ES flettendo i muoni in aria non in Ferro (“*air core magnets*”)

- Migliorare la risoluzione spaziale:

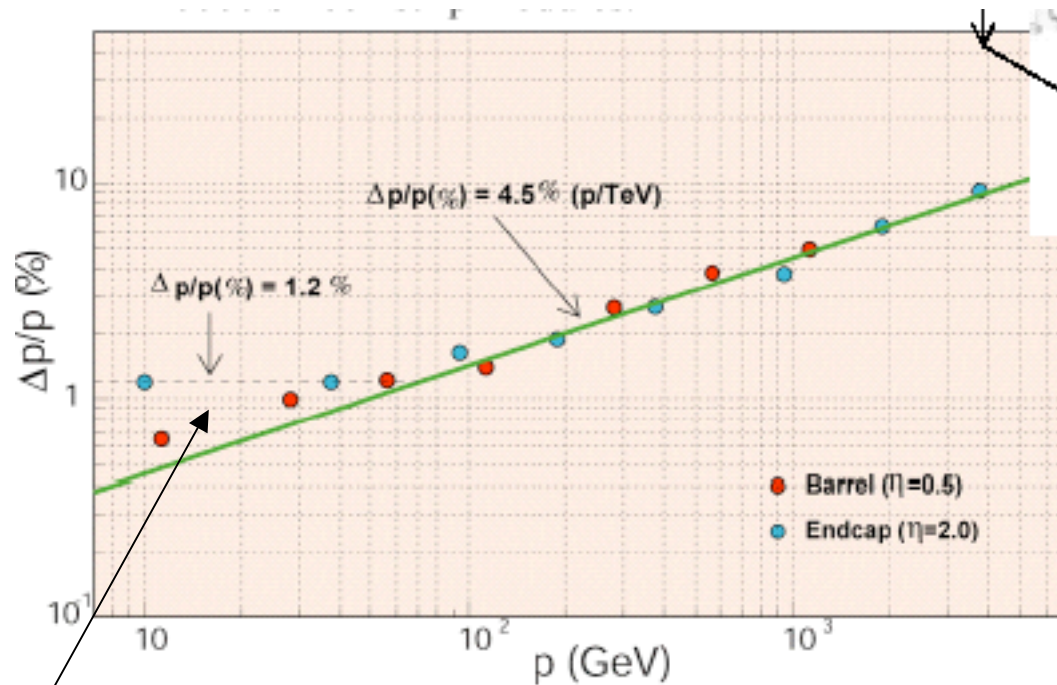
- con risoluzione intrinseca migliore
- aumentando la leva ($\mu 1/L^2$!!)

Un esempio di risoluzione di momento:

In CMS ($B = 4T$) ci si aspetta:

$$\Delta p/p_t \sim 0.15 \sqrt{p_t}$$

usando sia le informazioni del tracker centrale che delle camere a muoni



Domina lo sc mult

La risoluzione del momento e' importante per la fisica !!!

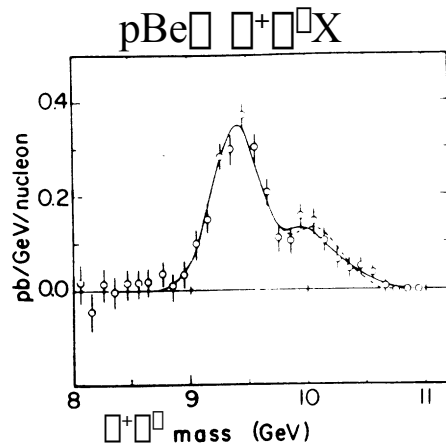
ES:

La NON scoperta della J/psi da parte di Lederman ai BLN

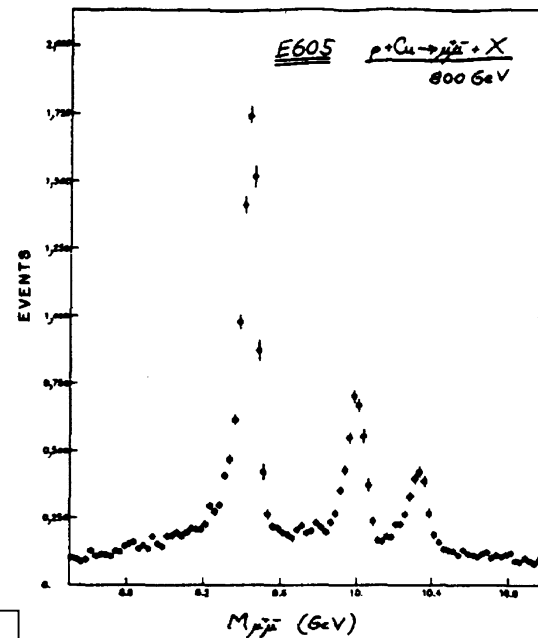
La scoperta della Upsilon al FNAL:

segnale prima e dopo aver migliorato la risoluzione dello Spettrometro !!

1977



1986



$$M_{\mu\mu}^2 \sim 4 P_1 P_2 \sin^2 \theta / 2$$

Momenti dei due mu

5 - Esempi di “tracking detectors”

Requisiti principali:

- buona risoluzione spaziale
- grande area => a basso costo...

Inoltre:

- tempo di risoluzione, segmentazione, velocità, resistenza all'invecchiamento, ...

Due tipi di rivelatori:

- a) Contatori a scintillazione
- b) Rivelatori a gas:
 - a filo
 - a piani

5-a) - Contatori a scintillazione (scint. organici disciolti in plastici):

- molto veloci : $\Delta t \sim 1\text{ns}$

=> posti prima e dopo assorbitori/magneti usati soprattutto come :

- trigger di muoni

- identificatori di muoni

- non ottima risoluzione spaziale: $\Delta x > 1\text{ cm}$ (se segmentati: *odoscopi*)

- dE/dx dei muoni $\sim 2\text{ MeV/cm}$

- molto facili da costruire, di forma voluta, ma abbastanza costosi.

Il rivelatore di muoni costruito a Brookhaven(E493):

2 assorbitori (blocchi di ferro di 40 e 50 cm di spessore) e 3 contatori a scintillazione



Usato solo per contare i muoni nel loro fascio di pioni, senza risoluzione spaziale

5-b) - Rivelatori a gas :

- $\tau_t \sim 1\text{ns}$ solo per alcuni tipi di rivelatori, altrimenti $\tau_t \sim 1\mu\text{s}$
 - buona, a volte ottima, risoluzione spaziale: $\Delta_x \ll 1\text{ cm}$
 - hanno o no bisogno di un trigger per essere letti
 - di geometria piatta o cilindrica
- ==> sono i rivelatori di tracce di muoni oggi più usati

Veloci, a bassa risoluzione spaziale:

Flash-tube chamber (1955) -> Flash chambers (1977) -> RPC (1981)

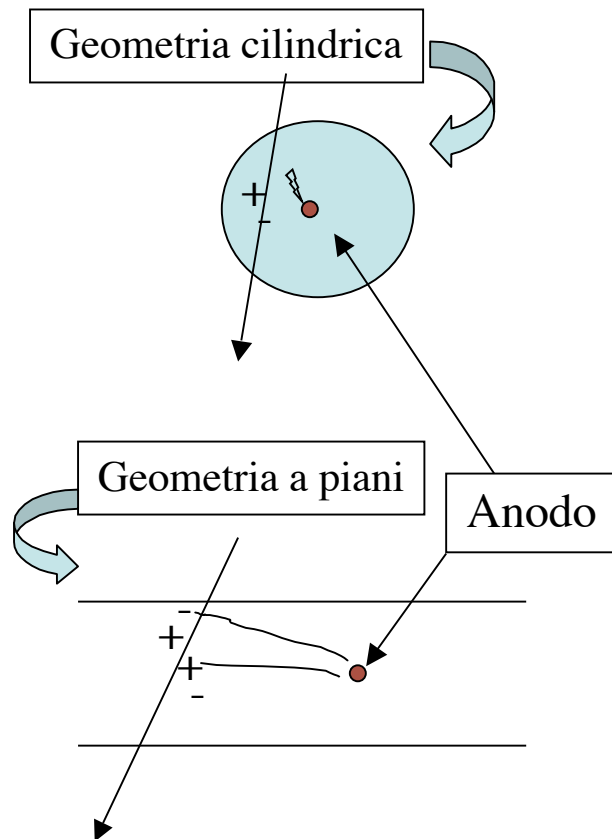
Più lenti, con ottima risoluzione spaziale, da *triggerare* :

Geiger-Muller, -> MWPC (1968), premio Nobel a Charpak -> Drift Chambers -> Drift Tubes

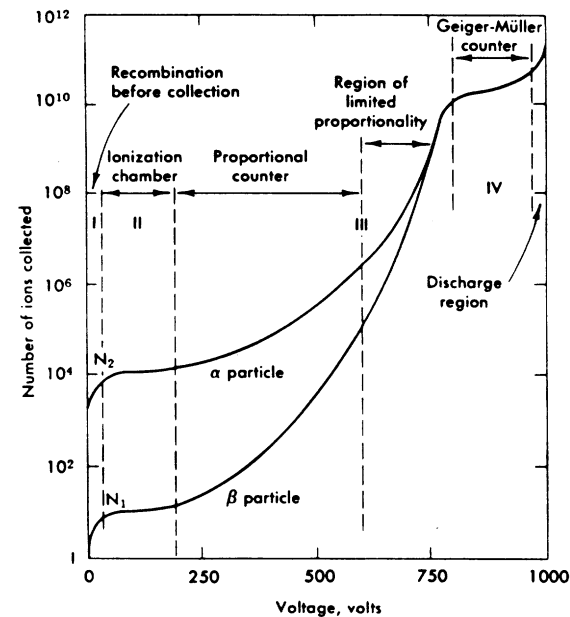
Rivelatori a gas a filo :

al passaggio di una particella carica, il gas si ionizza:

per esempio i muoni creano una coppia e^+e^- /30 MeV \Rightarrow ~ 100 coppie/cm di gas



Gli elettroni, in presenza di un campo elettrico, si muovono (“*drift*”) verso l’anodo, intorno al quale si ha una zona di amplificazione di carica ($\sim 10^6$), producendo un segnale rivelabile ($\sim 1 \mu\text{A}$)



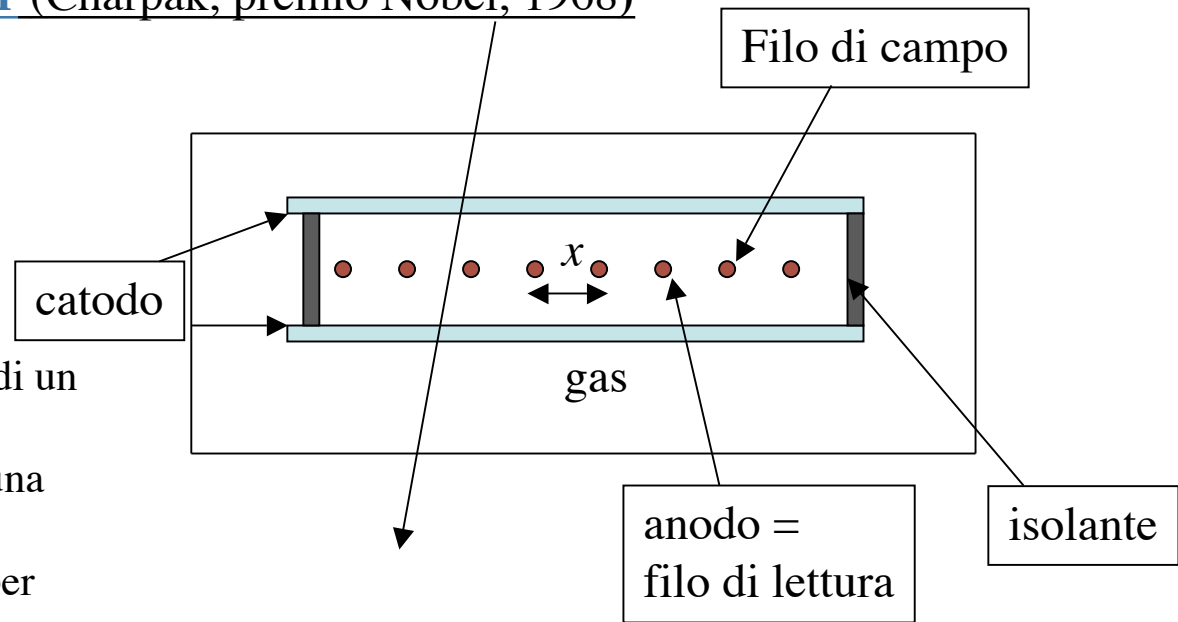
Multiwire Proportional Chamber (Charpak, premio Nobel, 1968)

Piu' fili segnale sono messi all'interno dello stesso volume di gas. Per 3 piani:

$$\square_s = x / \sqrt{12}$$

camera: perche' il tutto e' all'interno di un contenitore sigillato.

Le varie *camere* vengono poi messe, una dopo l'altra, con i fili segnale perpendicolari o ad angoli opportuni per risolvere l'ambiguita' destra/sinistra



Vantaggi:

- molte migliaia di fili
- geometria piana o cilindrica
- anche info digitale
- anche dE/dx !!
- anche info sulla posizione lungo il filo usando divisione di carica
- anche in campo magnetico
- facile de costruire
- sopporta alti flussi
- poca materia (*camere "trasparenti"*)

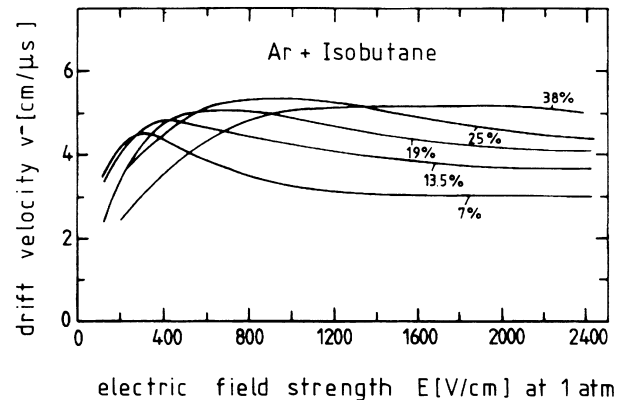
Svantaggi:

- bassa risoluzione spaziale
- basso guadagno => servono amplificatori miniaturizzati
- sistema di gas elaborato (controllo miscela)
- forze elettrostatiche fra i fili
- rottura di fili con "morte" dell'intero piano (*camera*) !!

Camere a deriva (Drift Chamber)

Geometricamente come le MPWC, ma con una miscela opportuna di gas

- *in modo che la velocità di deriva* (“drift”) degli elettroni (della ionizzazione) verso il filo di lettura (filo segnale, anodo) *sia costante*, indipendentemente dal valore del campo E all’interno della camera



la posizione viene calcolata dal tempo impiegato dagli elettroni a raggiungere il filo segnale (anodo).

$$x = \int_{t_0}^{t_s} v(t) dt$$

t_0 = tempo di passaggio della particella => dato da un altro contatore

t_s = tempodi arrivo degli elettroni sul filo segnale

$$\square_s < 100 \square m$$

Serve un trigger dall'esterno (cioè da un altro rivelatore)

Risoluzione spaziale delle camere a deriva;

σ_s e' migliore di un fattore 10 rispetto alle MWPC (σ_s (MWPC) = 1 mm => σ_s (DC) < 100 μ m)

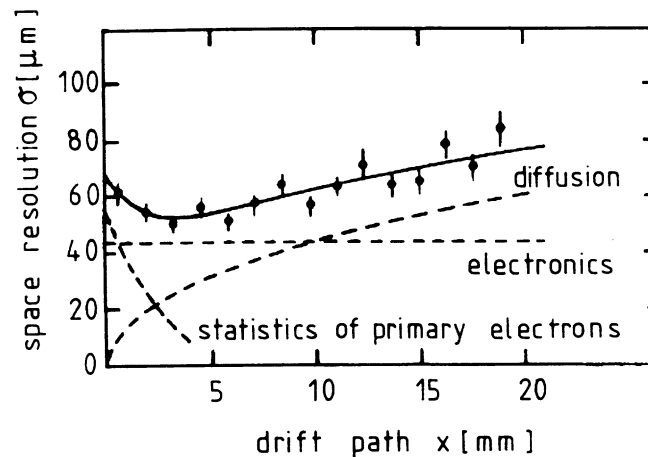
σ_s e' limitata da:

- locazione della ionizzazione primaria
- influenza del campo magnetico sulla traiettoria degli elettroni
- influenza del campo elettrico sulla traiettoria degli elettroni
- diffusione degli elettroni mentre si muovono verso il filo segnale:

$$\sigma = 1/\sqrt{N} (2Dx/\mu E)^{1/2} \quad \text{dove: } N = \text{num ioni primario; } D \text{ cost diffusione del gas}$$

$$\mu = \text{mobilita' ; } x = \text{dist di drift; } E = \text{campo elettrico}$$

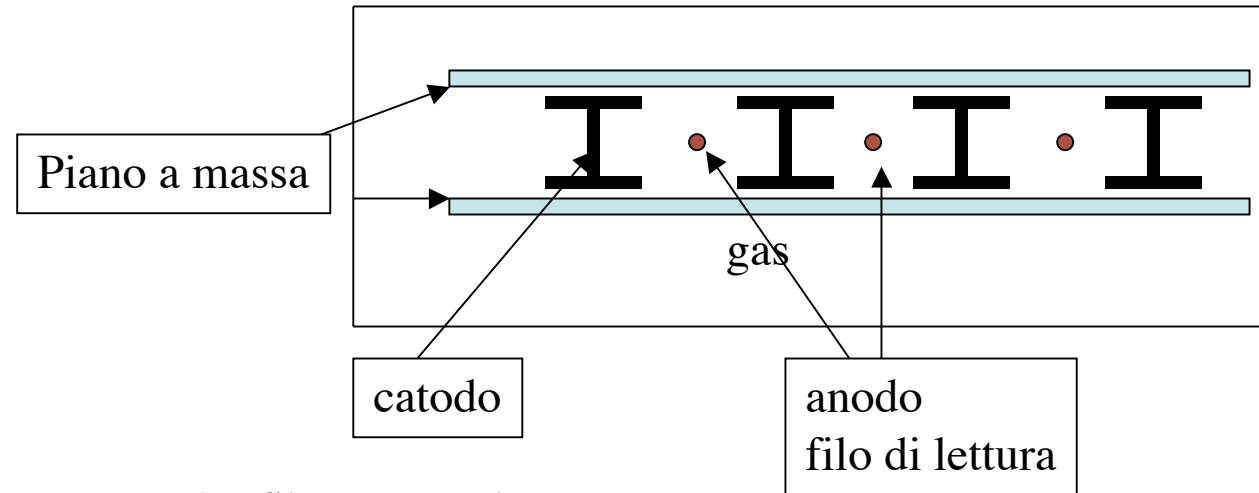
- precisione in t_0 e t_s (ceh dipendono da altri rivelatori)
- canali dell'elettronica di lettura (TDC)



Camere di deriva a celle (U.Becker, 1975) poi tubi a deriva (“Drift Tubes”)

Per avere una struttura robusta:

- il piano di fili catodico viene sostituito con un piano metallico
- i fili catodici vengono sostituiti con dei profilati a I



In questo modo:

- le celle sono completamente separate (un filo rotto = solo una cella morta)
- le camere non hanno bisogno di sostegno ne' di telai

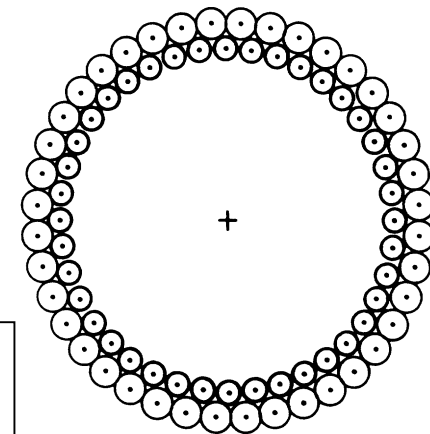
In seguito le celle sono state sostituite da tubi con al centro il filo segnale. La struttura:

- piana per targhetta fissa
- cilindrica per colliders

□_s tipica ~ 0.2 mm
□_s anche ~ 50 □m



Bisogna conoscere **bene** la posizione dei fili segnale



Rivelatori a gas a piani paralleli:

Può essere considerato un condensatore di capacità C e una carica $Q = CV_0$

Se si producono N ioni, gli e^- si muovono verso l'anodo e gli $ioni^+$ verso il catodo.

Se Δt moto $e^- \ll \Delta t$ circuito lettura
($RC \gg \Delta t$)

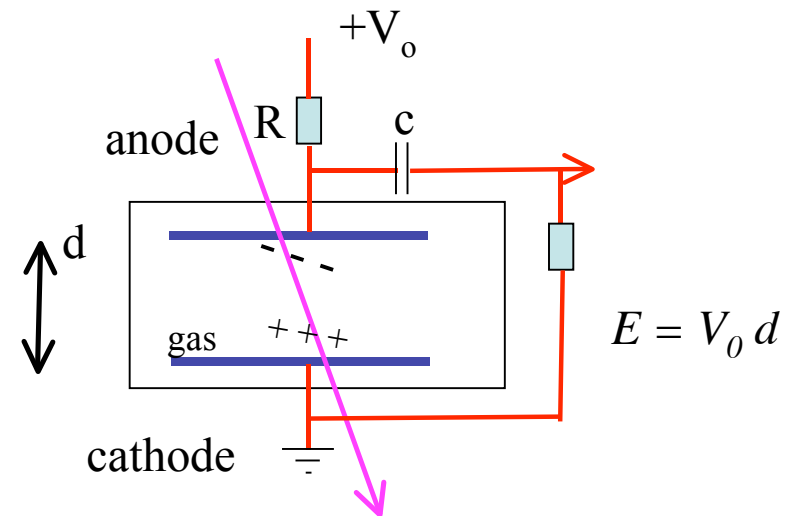
\Rightarrow la carica su ogni piano è diminuita di $N|q|$

ΔV_0 diminuisce di $\Delta V = N|q|C$

\Rightarrow e il nostro segnale è questo ΔV

V_0 può essere :

- sufficiente a produrre la moltiplicazione a valanga della ionizzazione primaria, con un guadagno di $1000 \div 10\,000$, senza scintilla
- sufficientemente alto da produrre una scintilla fra i piatti che può essere rivelata elettricamente o otticamente

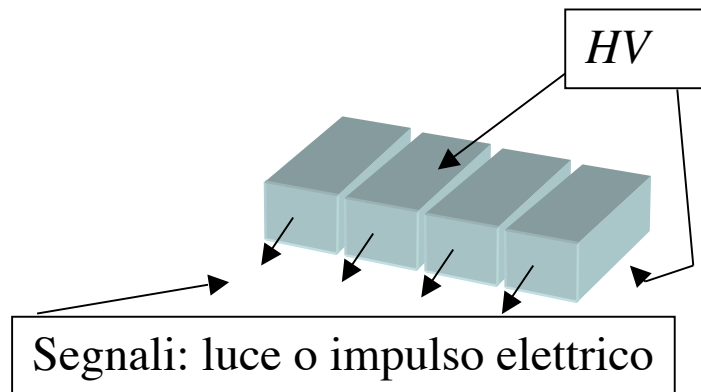


Δ_s **non** molto buona (dipende dalle dimensioni dell'anodo)

Non c'è bisogno di trigger esterno

Plastic flash-chamber (Conversi, 1977) :

Sono tubi di plastica riempiti di una miscela di gas nobili (per es. 30/70 Ne-He: “*spark chamber gas*”), con un campo di HV (\sim alcuni kV) applicato esternamente alle pareti per alcune decine di ns.



Rivelatori flessibili, anche di grandi dimensioni; celle a sezione cilindrica (vetro) o rettangolare (piani di polipropilene estruso: “*plastic chambers*”);
 Segnale: ottico o elettrico o entrambi.
 Il gas deve essere circolante per le camere di plastica a causa delle impurità elettronegative emanate dalle pareti a temperatura ambiente.

“*Se si applica un forte campo elettrico dopo il passaggio di una particella ionizzante in uno spazio pieno di gas (nobile), in esso si produce una scarica luminosa provocata dai processi di fotoionizzazione dovuti ai fotoni emessi dalla valanga di elettroni (creati nel gas dalla ionizzazione)*” [Conversi, 1977] La scarica avviene **in una sola cella** (isolata dalle altre) e l’insieme delle celle indica la traccia della particella carica.

=> L’applicazione dell’ HV e’ **triggerato** o dal segnale di passaggio della particella generato da un altro rivelatore o dal segnale “di fascio” .

=> $\square_s \sim \text{mm} \div \text{cm}$; non molto veloci; *recovery time* ~ 80 ms; molto economiche, semplici e robuste

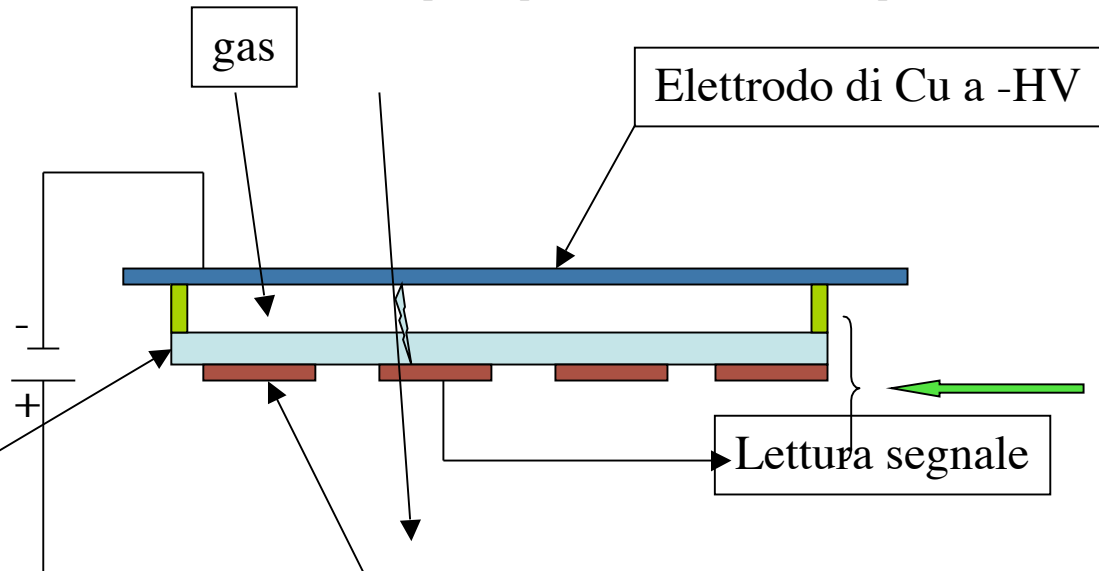
Camere a scintilla (spark counter) a grande area e ottima risoluzione temporale (Pestov, 1970):

(55%Ar+30%etere+10%aria+5%divinile) per impedire la formazione di polimeri

La classica *spark chamber* ha il problema di una basso tasso di lettura (10^3 conteggi/s).

Sostituendo un elettrodo

[un materiale ad alta resistività ($\sim 10^8 \div 10^9 \ \Omega \text{ cm}$) + strato metallico conduttore sulla superficie esterna]
(per es vetro semiconduttore)



La scintilla, iniziata nel gas dopo il passaggio della particella carica, si scarica in un'area di piccola superficie dell'elettrodo semiconduttore, e il resto della superficie rimane indisturbato.

=> Ottima risoluzione temporale: ~ 1 ns

=> Si puo' anche costruire lo strato metallico a "pad" e avere una lettura x-y

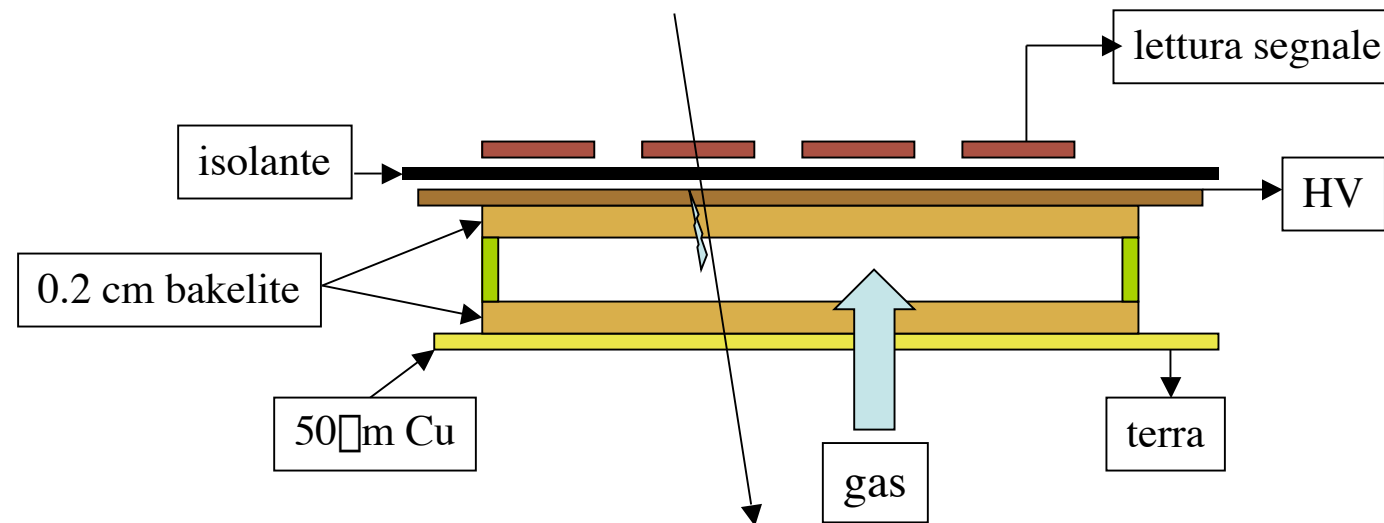
$\square \square_s$ dipende dalle dimensioni delle pad

Resistive Plate Chambers (RPC) (Santonico, 1981)

Vetro -> bakelite : l'alta resistività $\sim 10^{10} \div 10^{11} \Omega \text{ cm}$ localizza la scarica

Gas -> ad alto coeff di assorbimento per raggi UV: impedisce il loro propagarsi lungo la cella
(ES: 50% Ar + 50% butano a NP)

$$V_0 = 9 \text{ kV} / 1.5 \text{ mm} \Rightarrow 60 \text{ kV} / \text{cm}$$



A causa dell'alta resistività della bakelite, il piano di HV e' trasparente agli impulsi elettrici che sono all'interno della cella che così possono venire letti da opportuni elettrodi di lettura, isolati dal piano HV.

Sono rivelatori molto flessibili, poco costosi, con ottima risoluzione temporale: $\sim 1 \text{ ns} !!$

τ_s dipende dalla dimensione degli elettrodi di lettura segnale

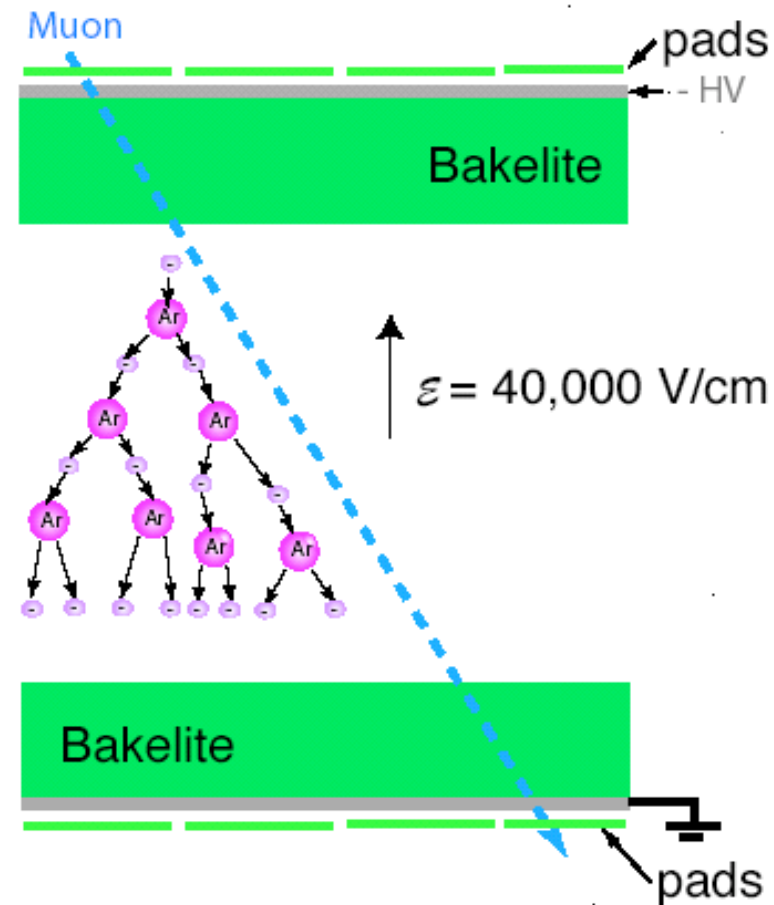
Resistive Plate Chamber :

In seguito si sono avuti innumerevoli modelli di RPC, che sono oggi usate in moltissimi esperimenti;

- si e' utilizzato anche il piano terra per leggere, al di la' di esso, l'altra coordinata
- lettura comune da due celle (per economizzare sull'elettronica di lettura)
-
-

Problema:

non alta resistenza alle radiazioni (all'usura) => notevole R&D in questi ultimi anni per cercare di risolvere questo problema



RPC in Babar

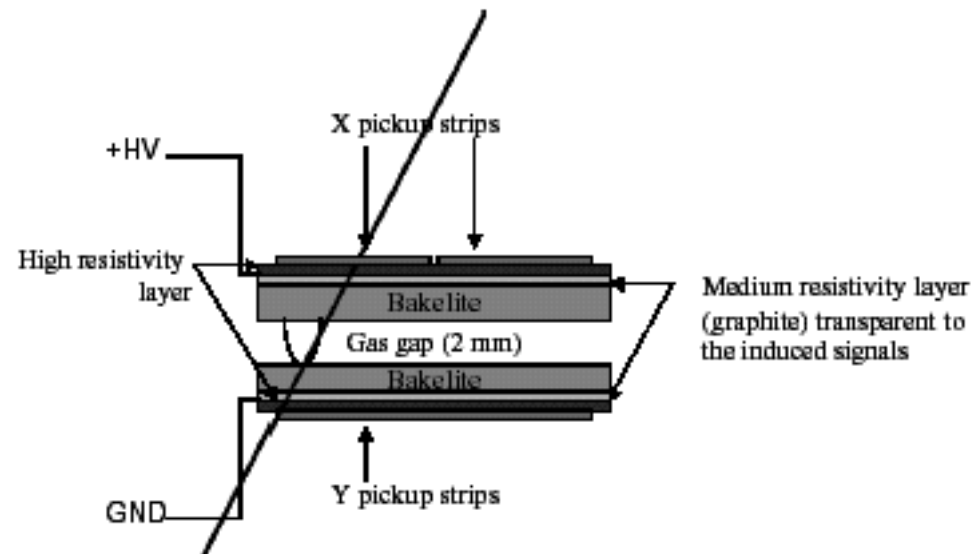
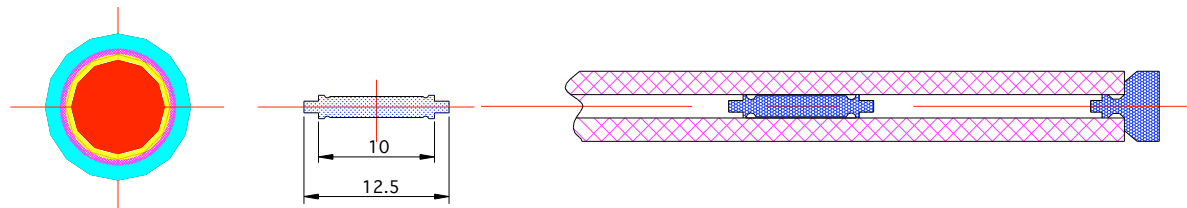
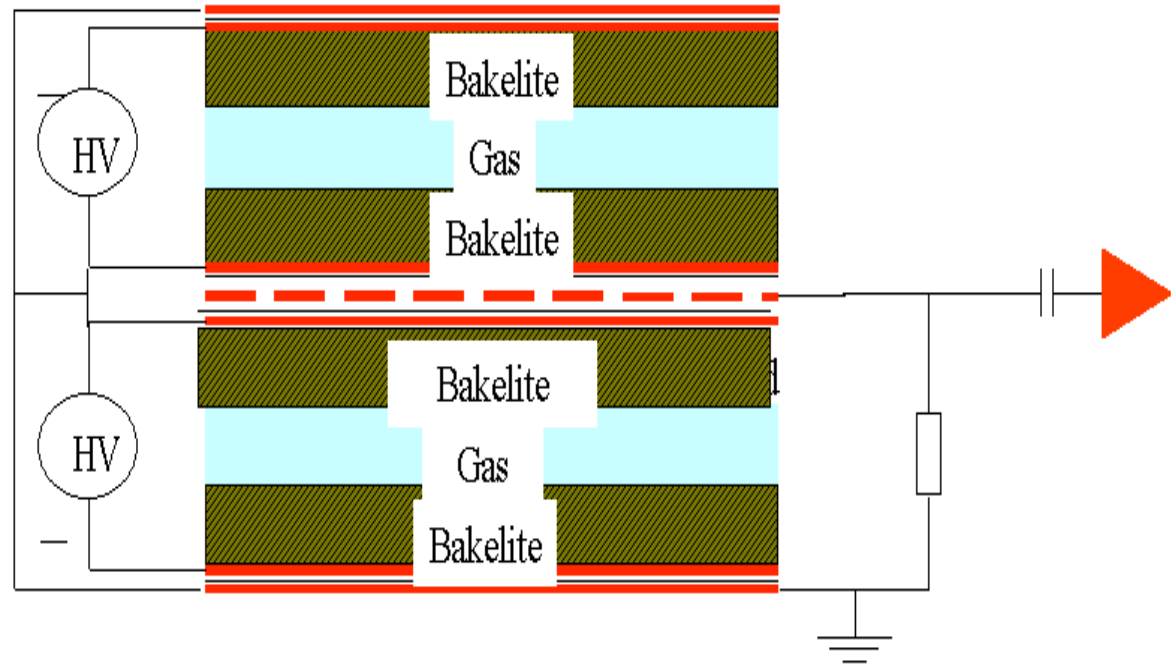


Fig. 1. Schematic drawing of the single-gap streamer mode RPC used by the BABAR experiment [52].

RPC in CMS

- Ar:F134A: Iso-butane = 30:58:12
- HV=8400V



6 - Esempi di magneti:

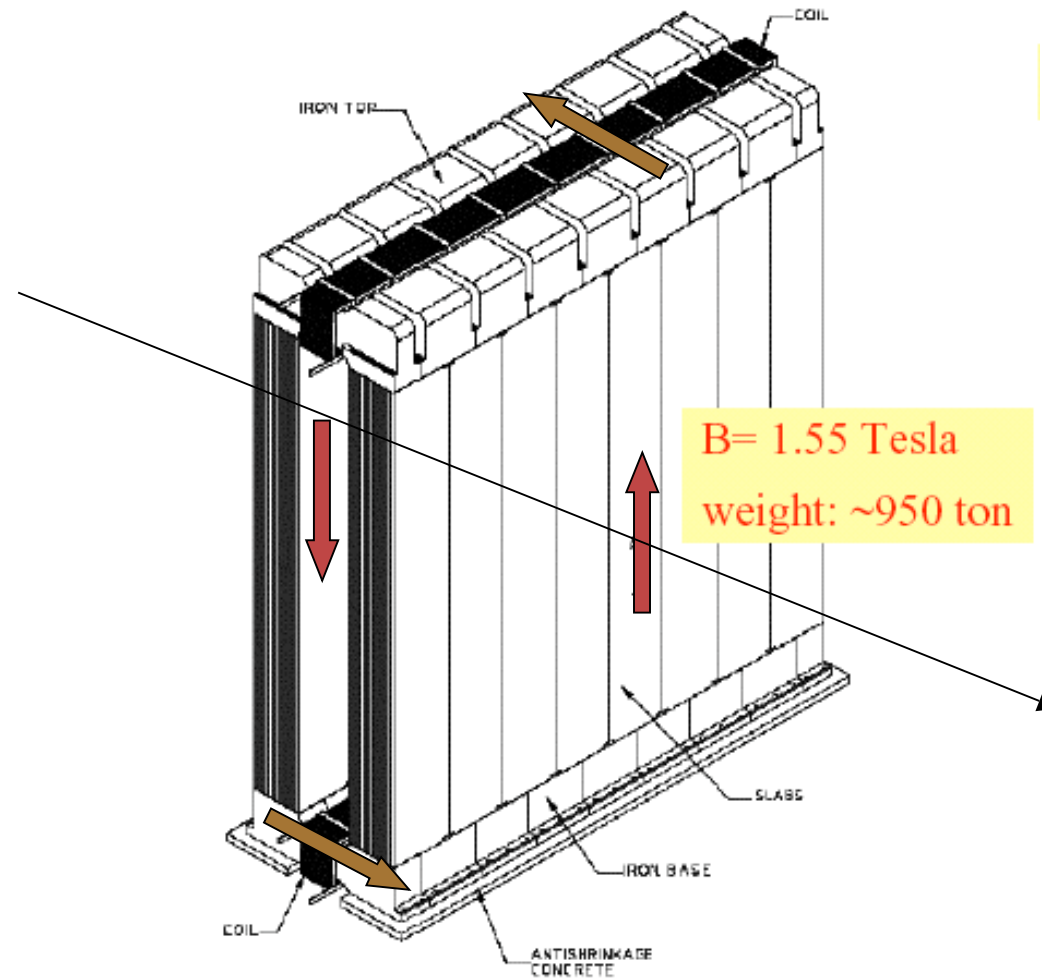
Senza campo magnetico ! => Assorbitori:

- il ferro : il più usato : alta densità (7.87 g/cm^3), basso costo, può essere magnetizzato;
- cemento ($\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$).....;

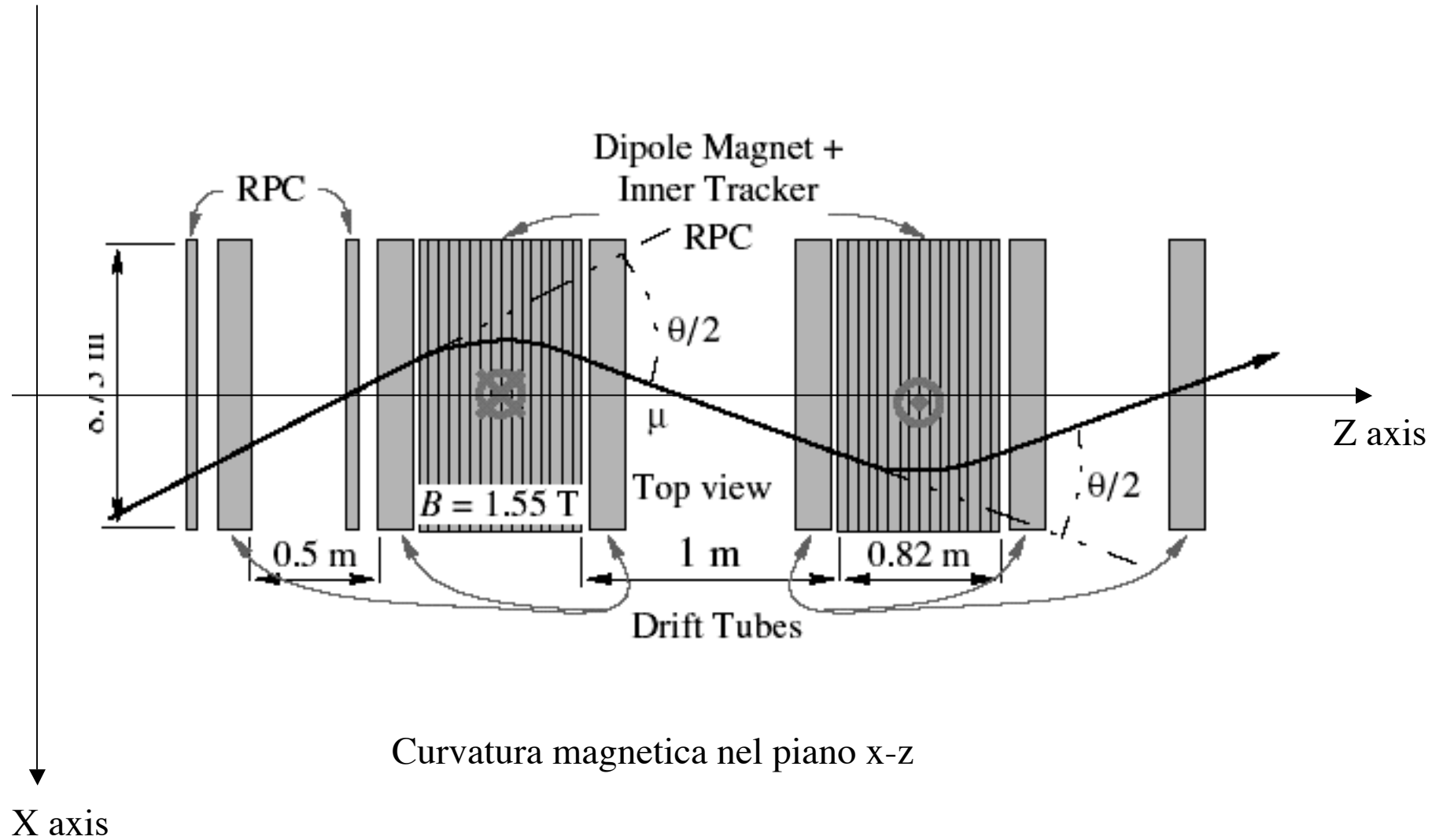
Con campo magnetico => Magneti:

- a **dipolo** (targetta fissa) o a solenoide (colliders), $B \sim 2\text{T}$:
 - > di “medie” dimensioni (pochi m^3)
 - > criogenici o caldi (ad alto consumo energetico)
- **toroidi di ferro magnetizzato**, saturano a $\sim 2\text{T}$:
 - > anche di volumi molto grossi (centinaia di m^3)
 - > a basso consumo energetico
- **magneti superconduttori “ vuoti” (“air core”)** :
 - > con campo simile ai toroidi, ma senza multiple scattering
 - > criogenici e di disegno molto complesso

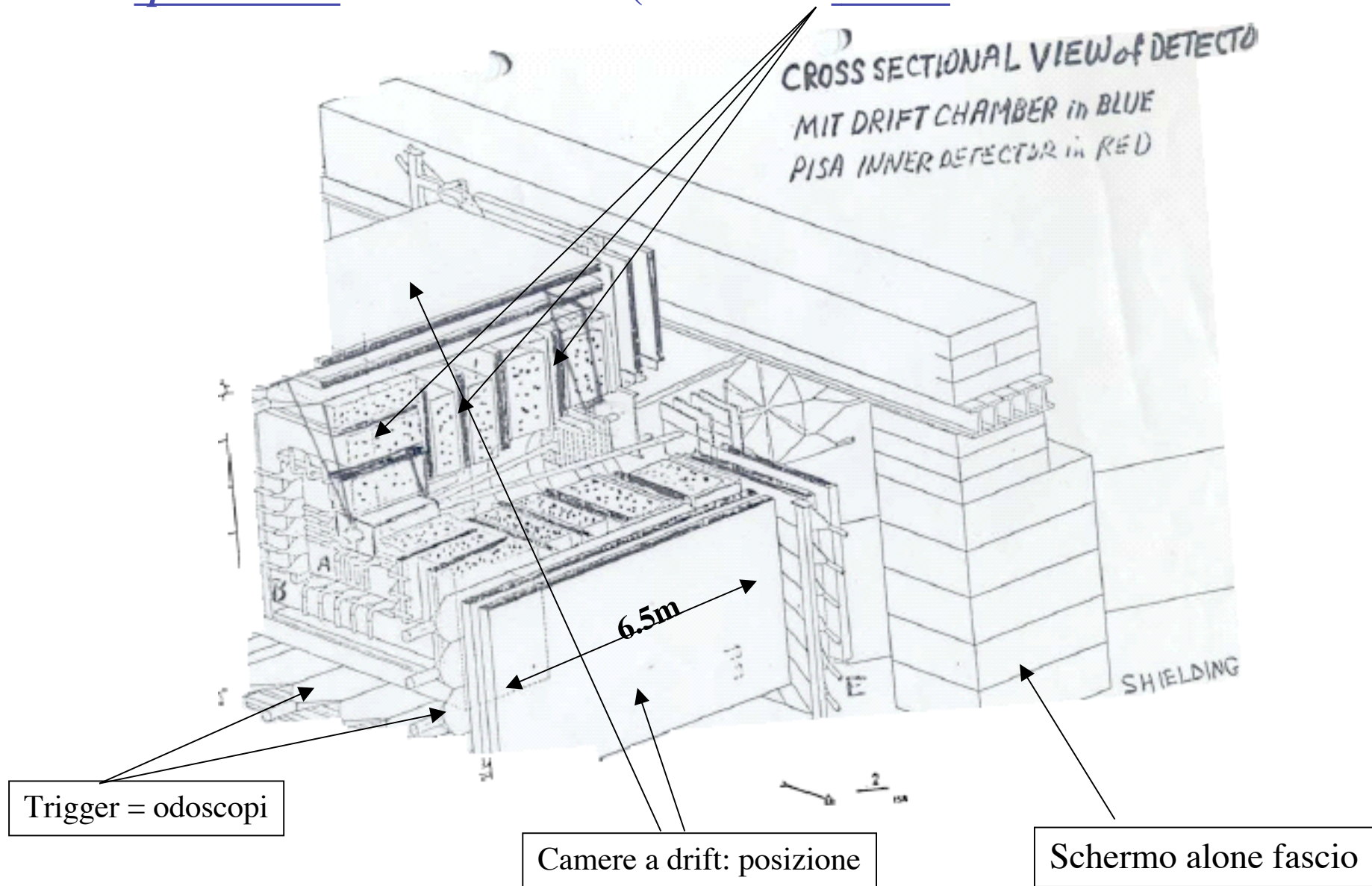
Il dipolo dell'esperimento OPERA al Gran Sasso



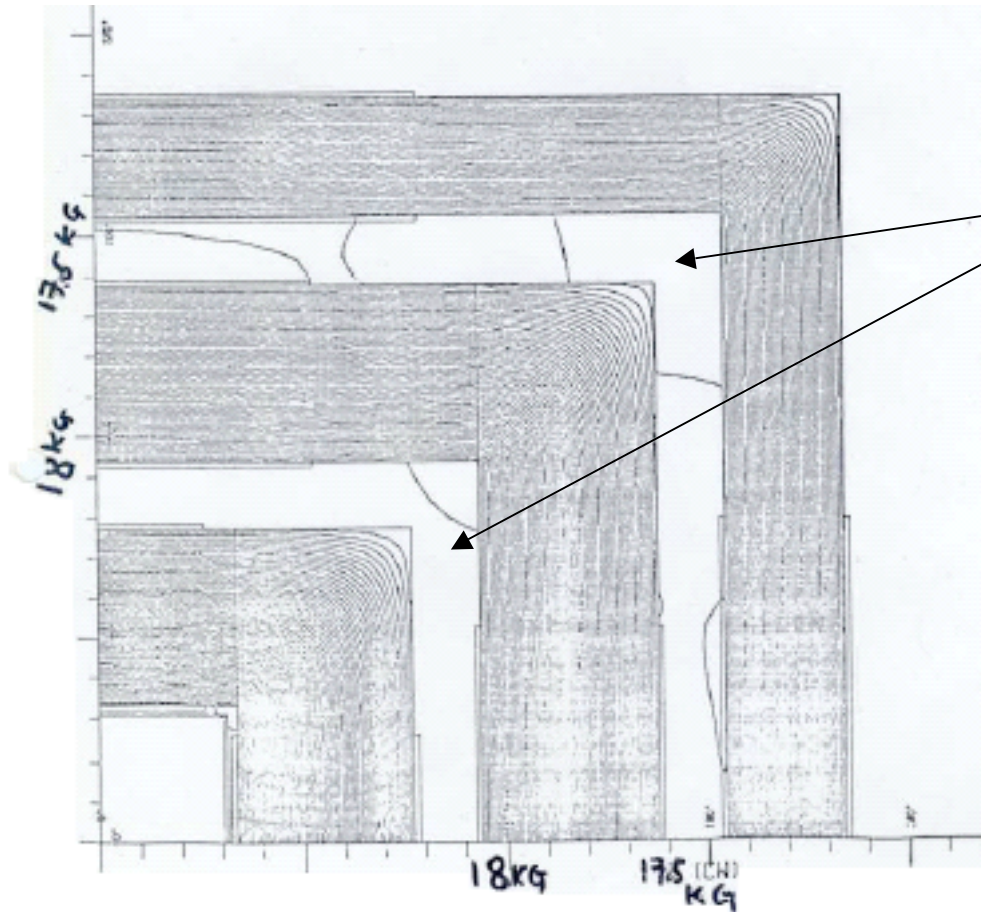
Vista dall'alto dello spettrometro di OPERA con 2 dipoli



Lo spettrometro a muoni all'ISR (R209 con 3 toroidi)

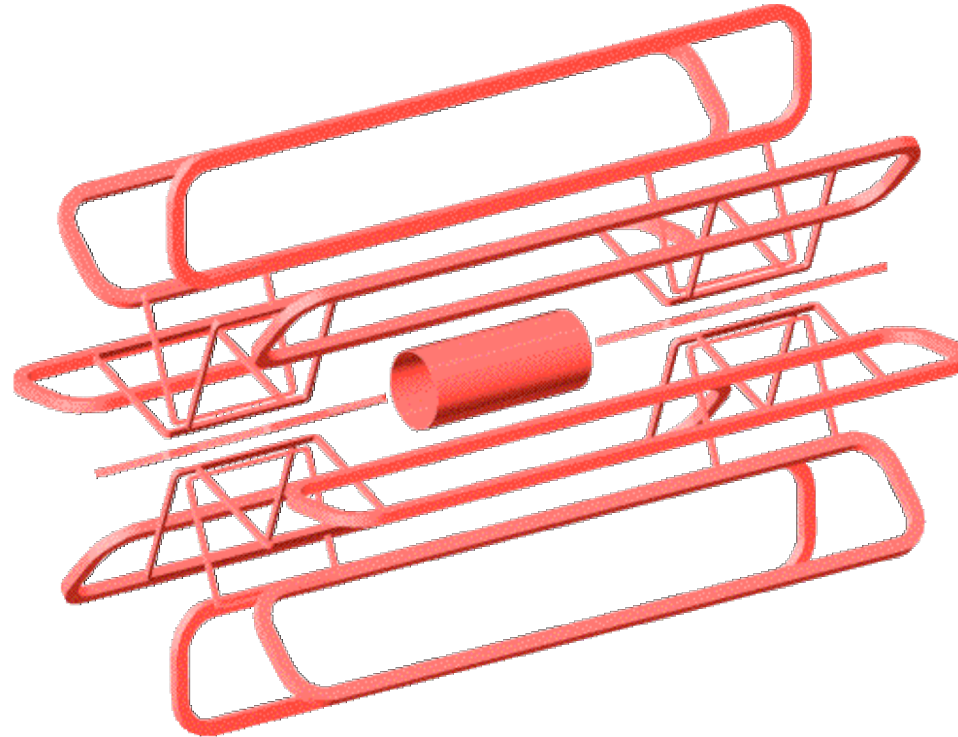


Campo magnetico dei toroidi di ferro (R209): 17.5 kG

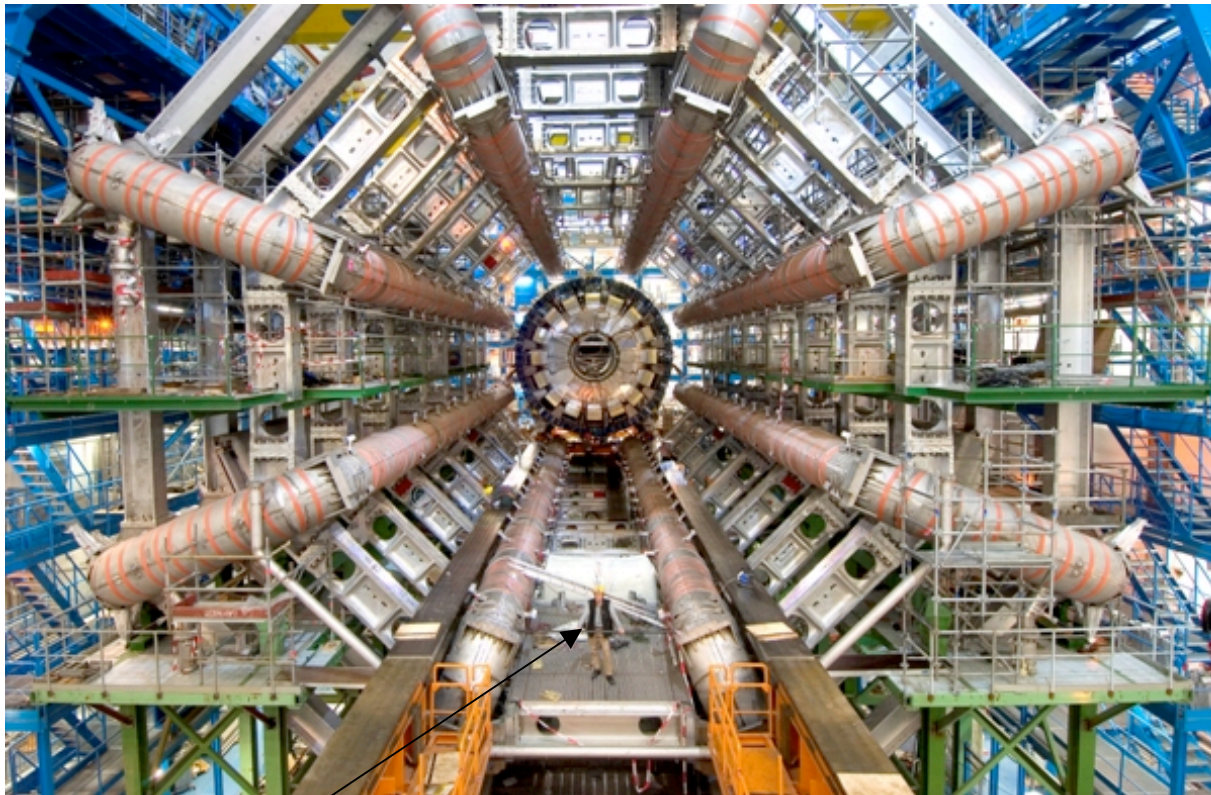


Campo ~ nullo nel
volume delle camere a
muoni

**Il magnete superconduttore “vuoto” (“air core magnet”)
di ATLAS al CERN: schema**



Il magnete superconduttore “vuoto” (“*air core magnet*”) di ATLAS al CERN: foto

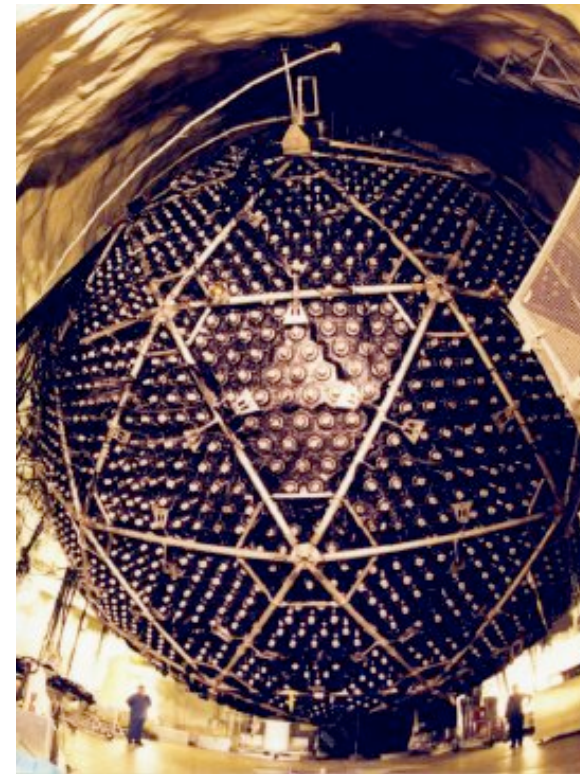


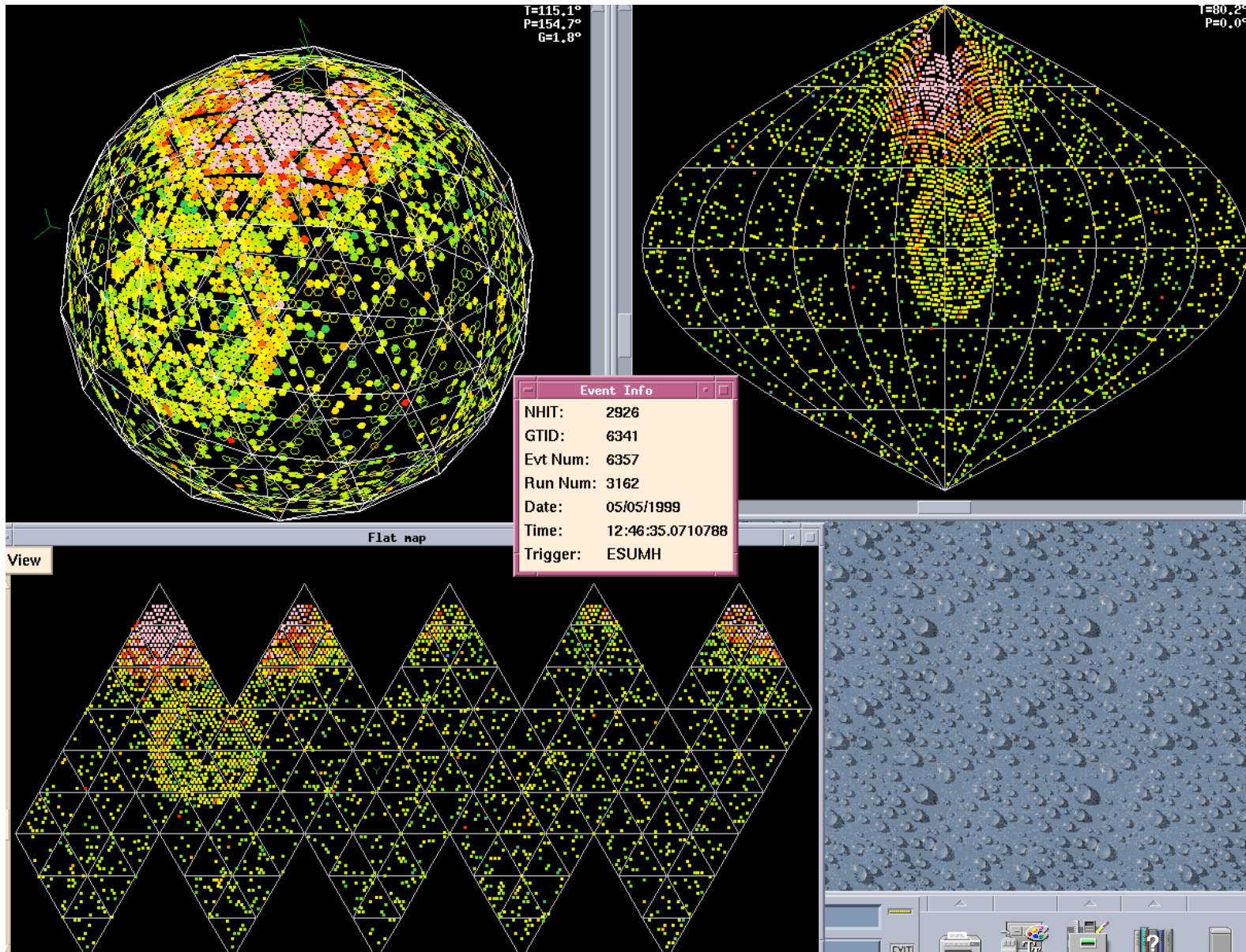
uomo

7 - Esempi di “rivelatori a muoni”

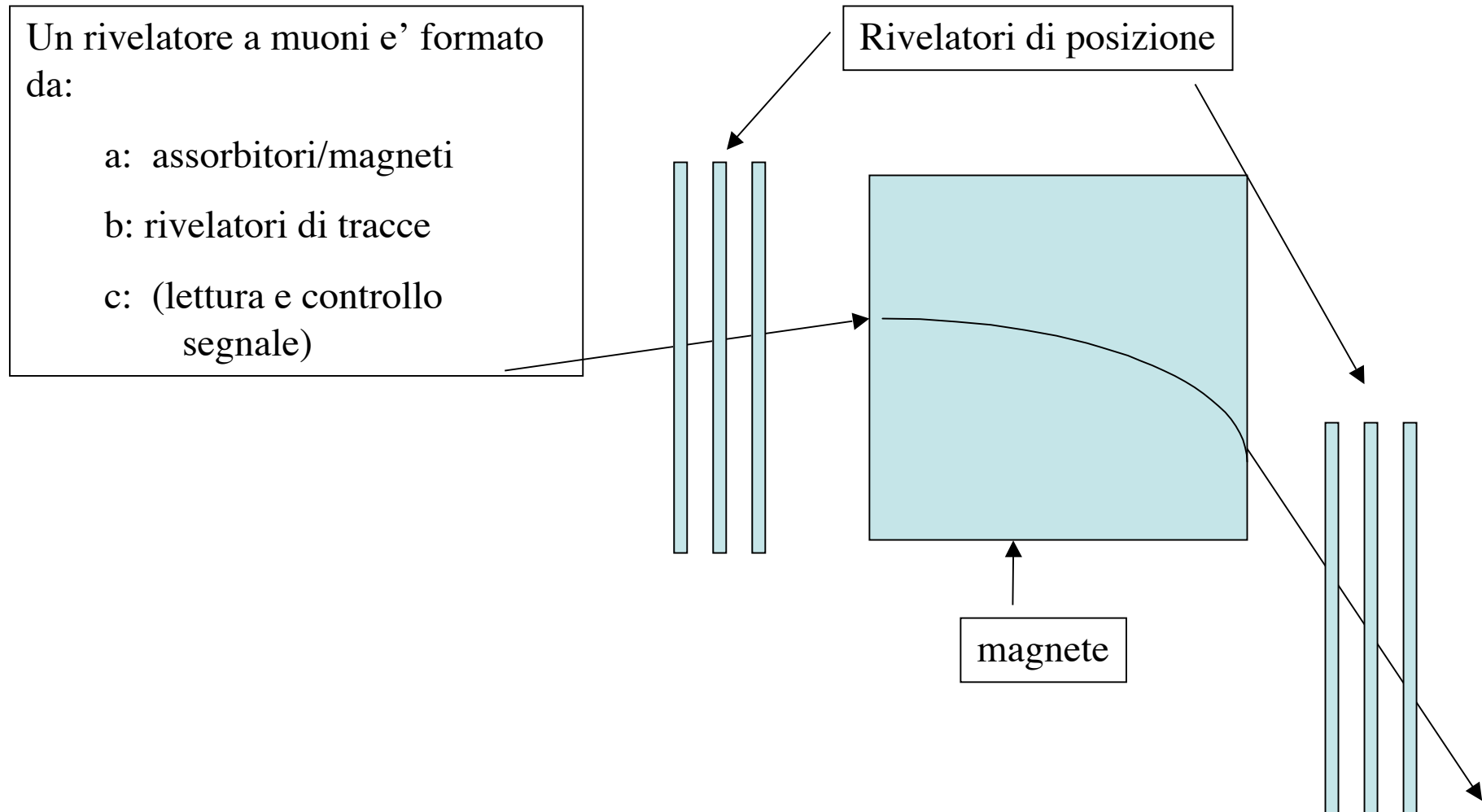
- a) Rivelatori Cherenkov !!
- b) Spettrometri per muoni

7-a) Il rivelatore di muoni Cherenkov di Sno (Sudbury Neutrino Observatory - Canada)

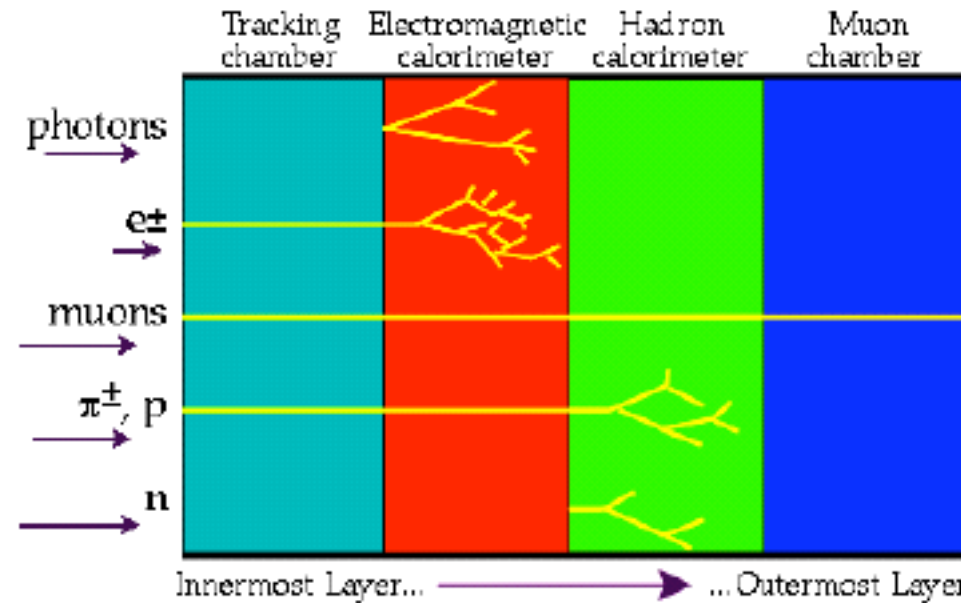




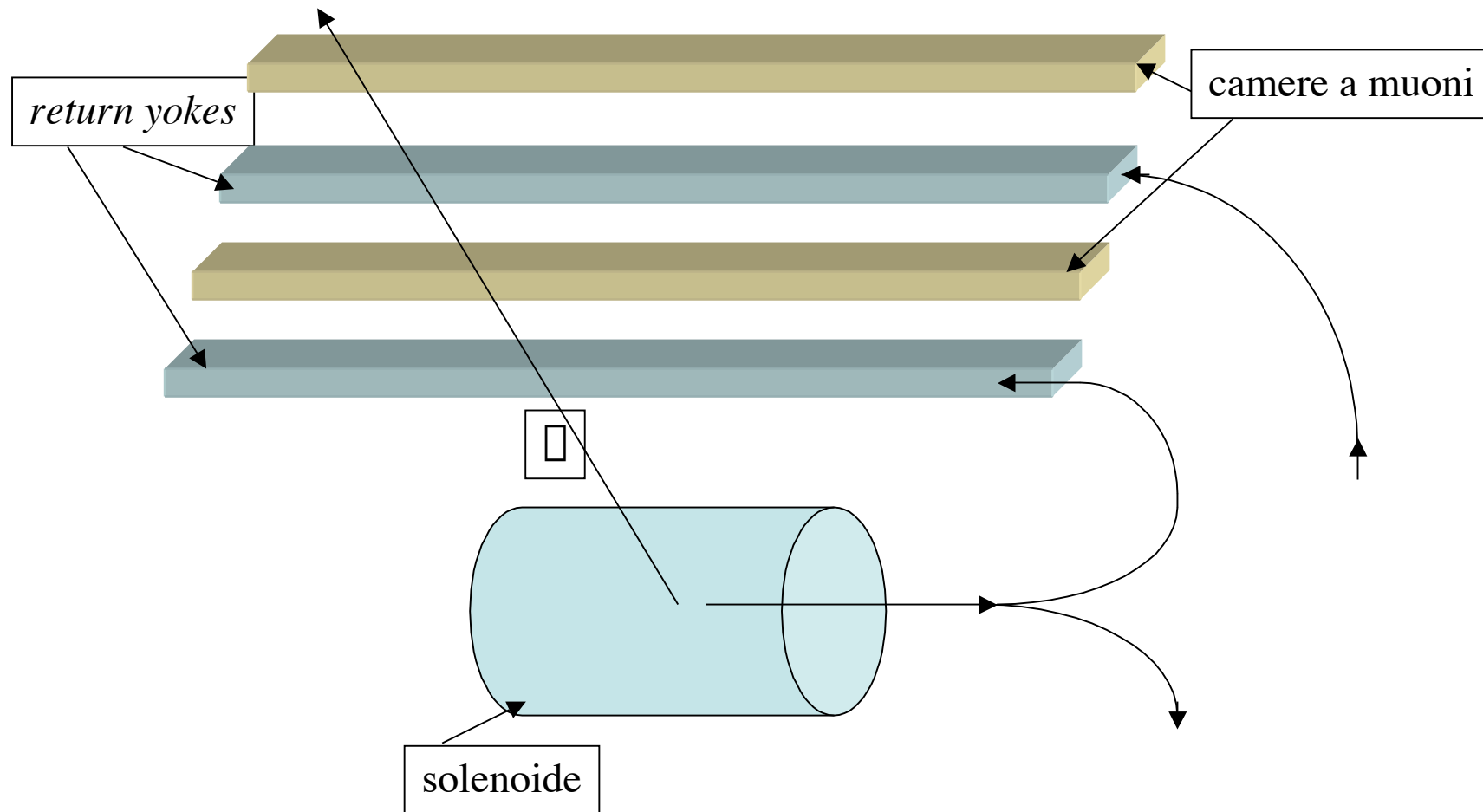
7-b) Spettrometro a muoni



I rivelatori a muoni sono i rivelatori piu' esterni !!

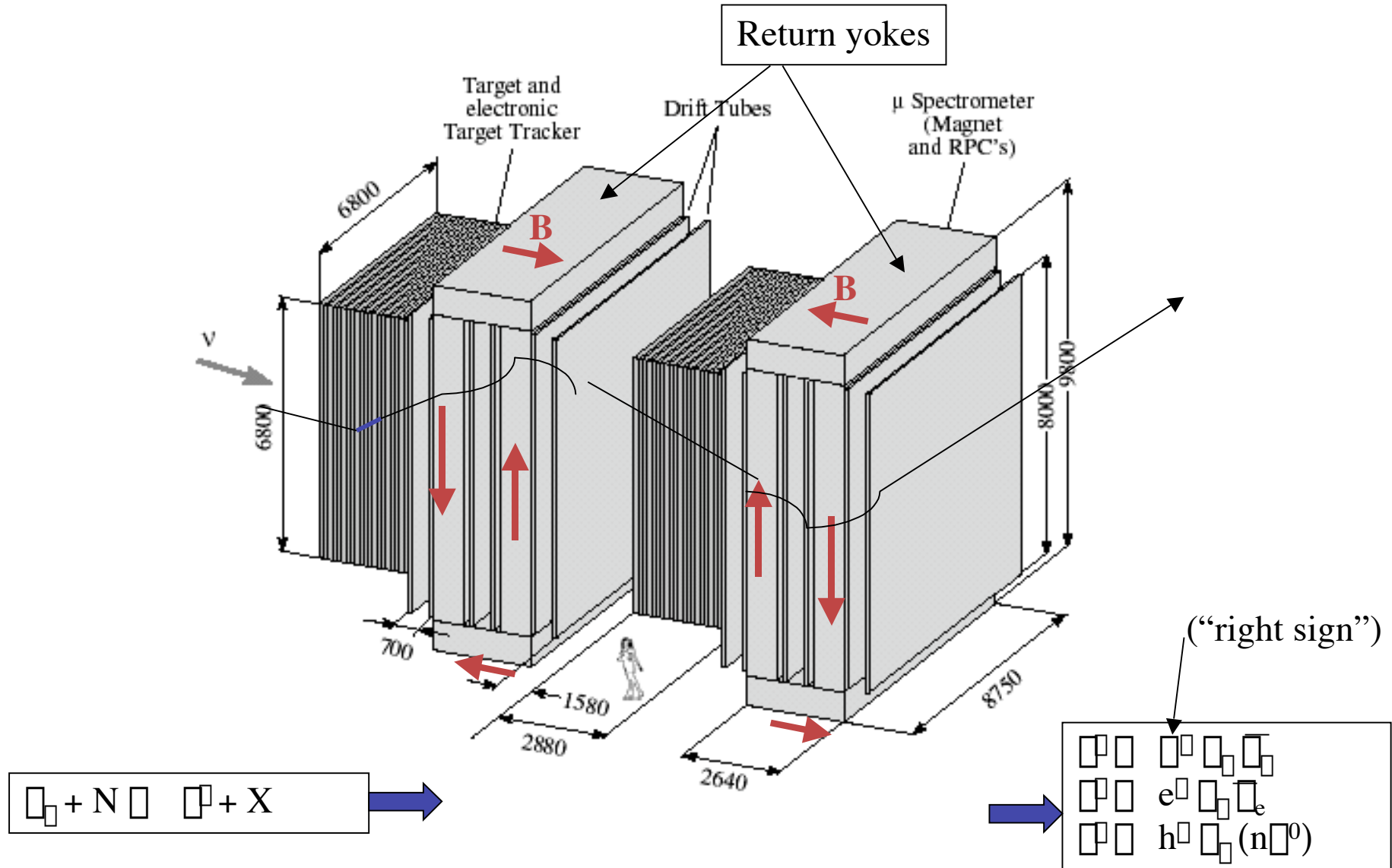


No single detector can determine
identity and measure
energies/momenta of all particles



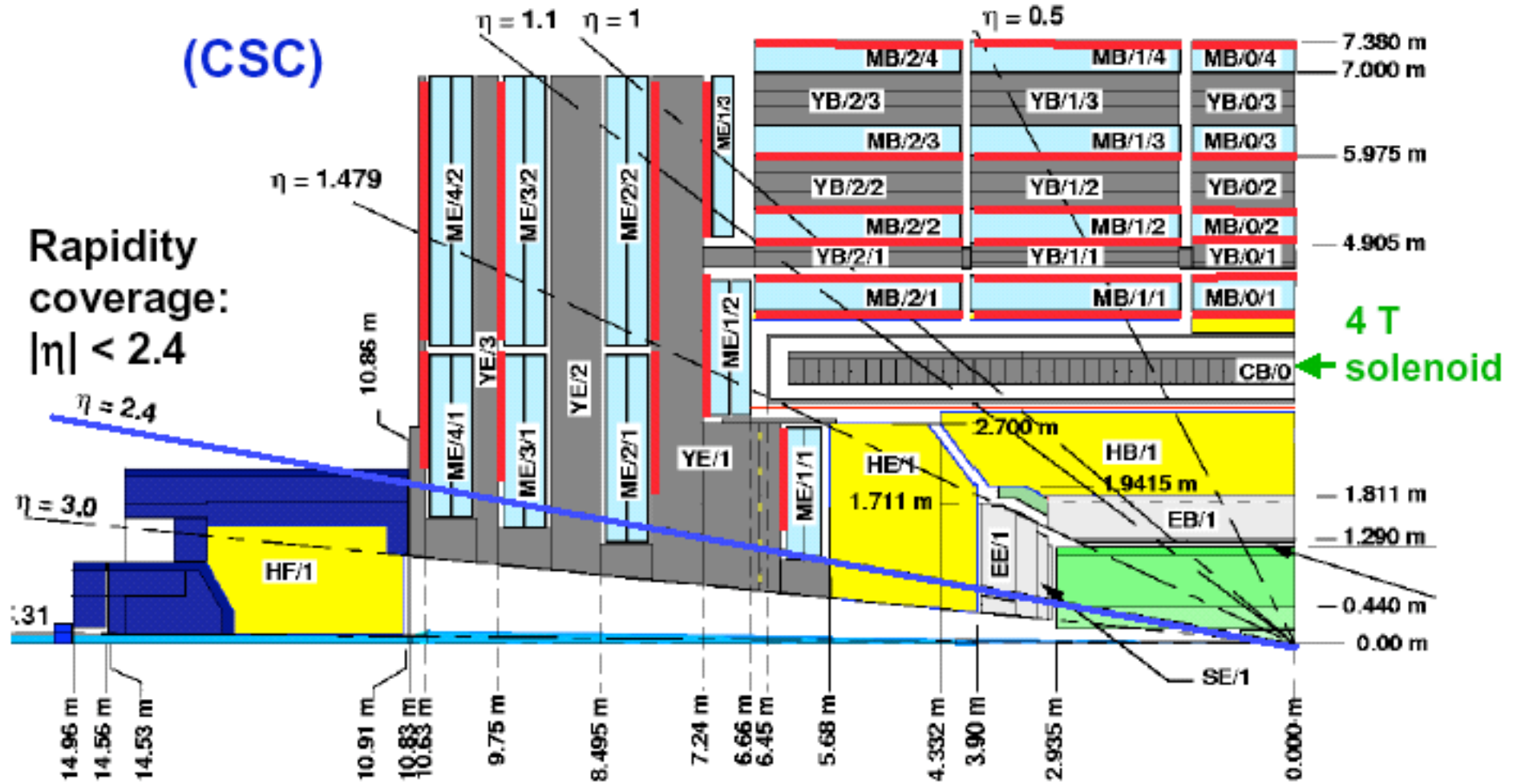
Se si usa un magnete (di qualunque tipo) , per convogliare le linee di ritorno del campo magnetico spesso si usa un *return yoke*, che viene usato come parte dello spettrometro a muoni (assorbitore)

Lo spettrometro dell'esperimento OPERA al Gran Sasso



Lo spettrometro CMS-CERN (RPC)

(DT)



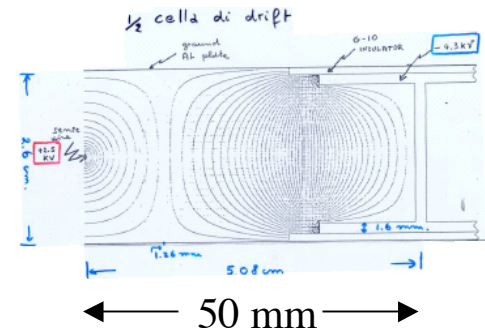
Rapidity coverage: $|\eta| < 2.4$

4 T solenoid

Muon momentum measurement uses return field of iron yoke

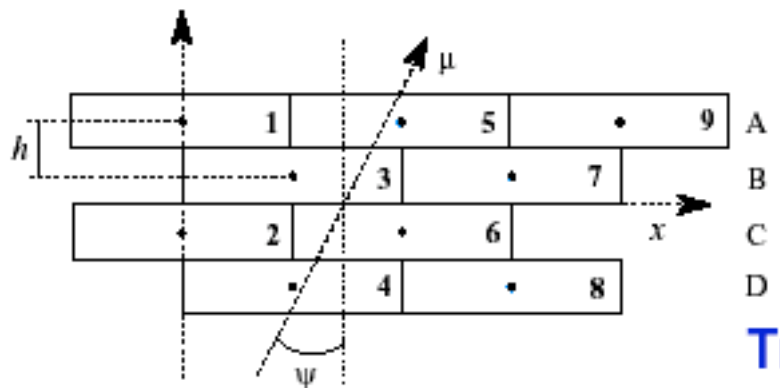
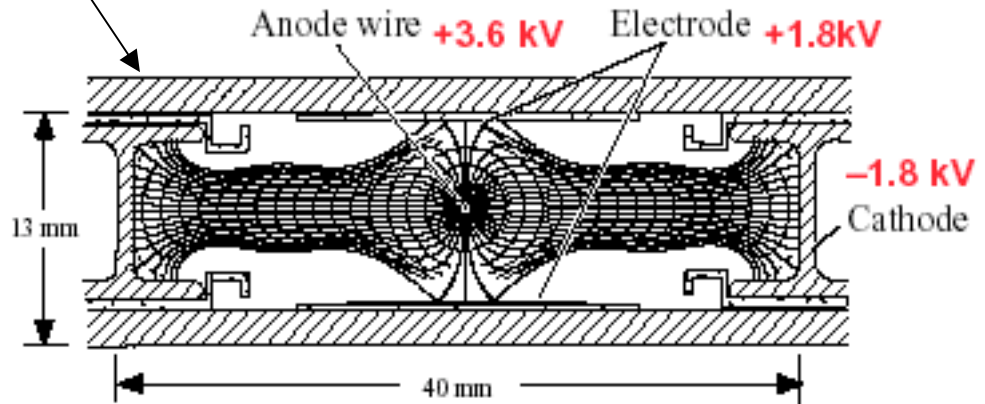
CMS Drift Tube Chamber

R209 drift cell



Gas: miscela Ar/CO₂
 Max drift time= 400 ns
 Risoluzione una cella = 250 μm
 Risoluzione camera = 100 μm

CMS DTC

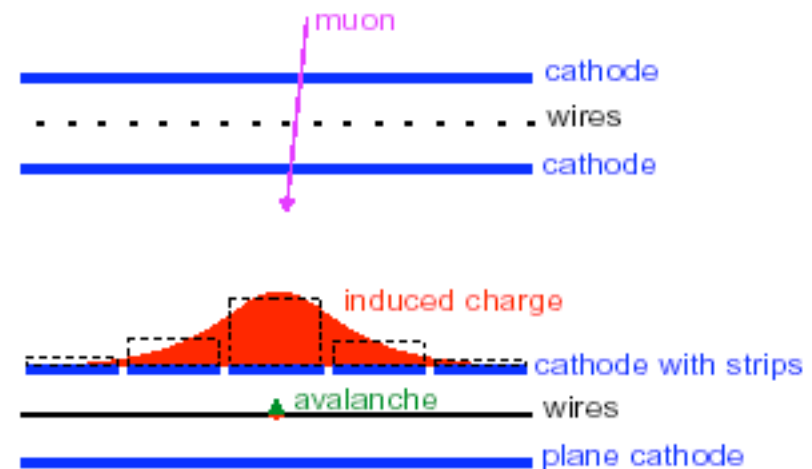


CMS Cathode Strip Chamber

50 μm wires spaced by 3.2 mm
 60 ns maximum drift-time per plane
 5 to 16 wires ganged in groups
 Wires measure r

6.7 to 16.0 mm strip width
 Strips run radially to measure ϕ
 150 μm resolution for chambers
 (75 μm in station 1)

Gas: Ar(40%)+CO₂(50%)+CF₄(10%)
 HV ~3.6 kV
 B-field up to 3 T in station 1

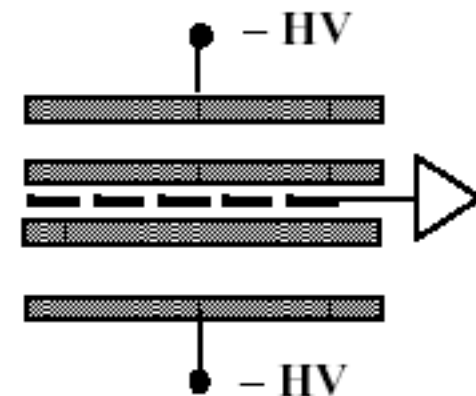
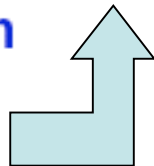


- ⌚ Up to 3.4 m long, 1.5 m wide
- ⌚ 6 planes per chamber
- ⌚ 9.5 mm gas gap (per plane)

CMS Resistive Plate Chamber

Double-gap design:

- ⌚ 2 gaps with common pick-up
- ⌚ Gap width: 2 mm
- ⌚ Bakelite thickness: 2 mm
- ⌚ Bakelite bulk resistivity: $1-2 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$
- ⌚ Gas mixtures: $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (95%), $i\text{-C}_2\text{H}_{10}$ (5%)
- ⌚ Operating High Voltage: 8.5 – 9.0 kV
- ⌚ Mode of operation: avalanche, not streamer
- ⌚ 3 ns time resolution

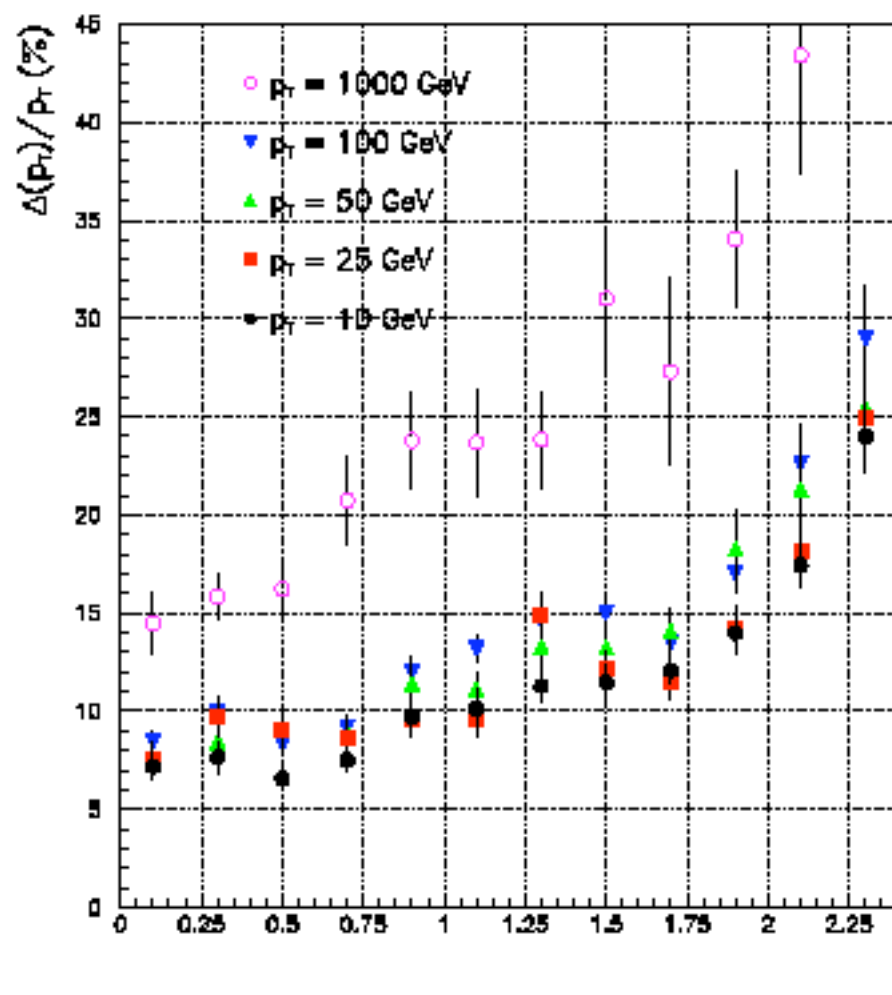




CMS Muon Momentum Resolution

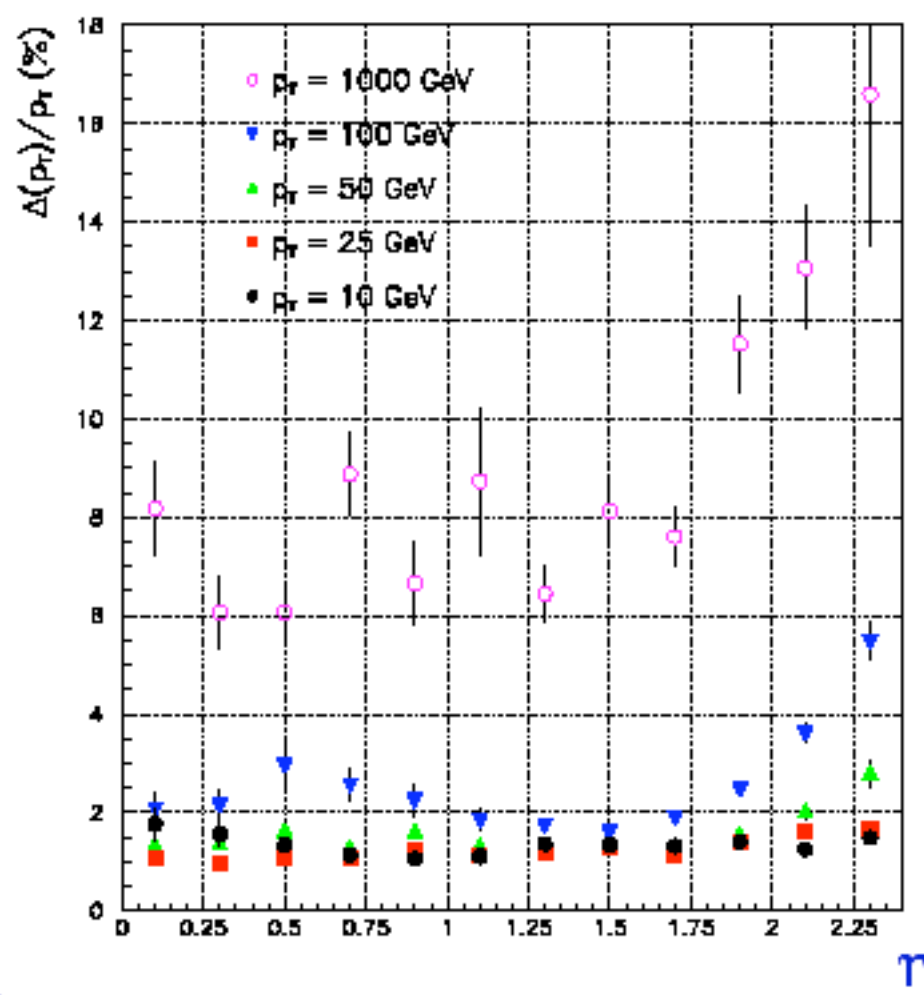
Standalone

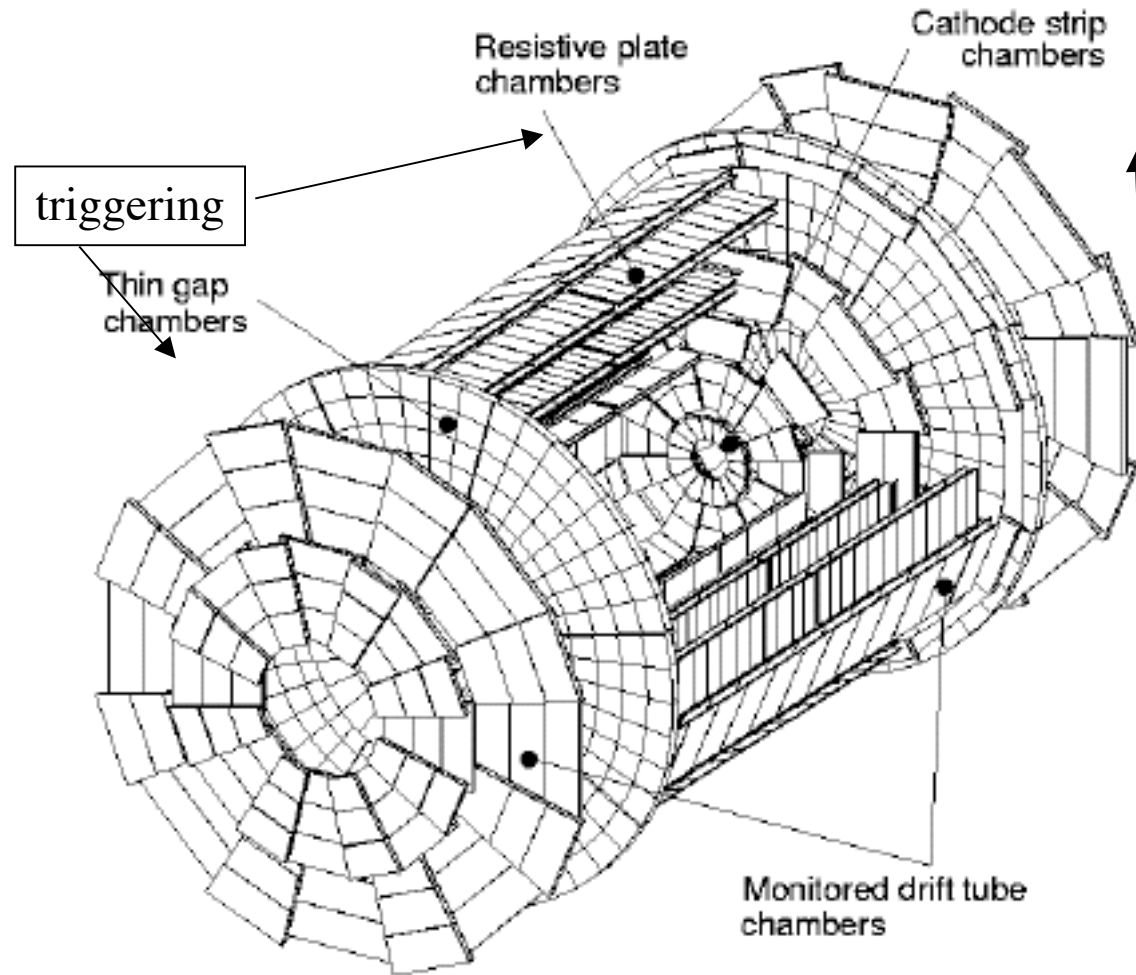
Tracking Resolution—Muon System with Vertex Constraint



Combined with Tracker

Tracking Resolution—Muon System with Inner Tracker





	Precision chambers		Trigger chambers	
	CSC	MDT	RPC	TGC
Number of chambers	32	1,163	1,136	1,584
Number of channels	31,000	370,000	385,000	322,000
Area covered (m ²)	27	5,500	3,650	2,900

tracking

ATLAS \square tracking: MDT chambers

Monitored Drift Tubes

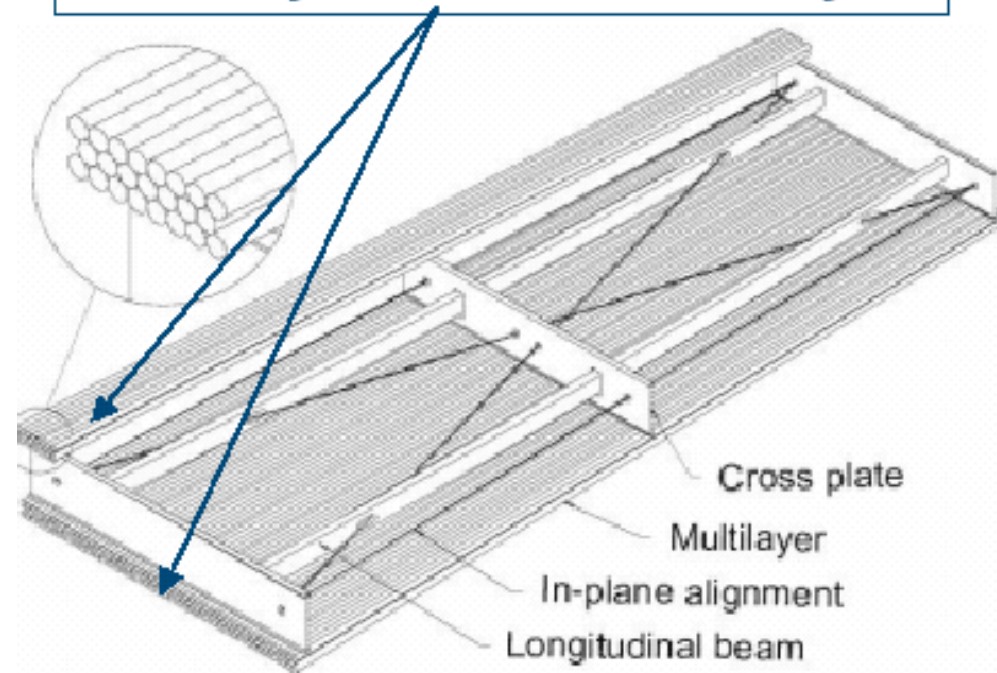
Tube: Al, 30 mm ϕ , 0.4 mm wall

Wire: 50 μ m, W/Re alloy (97/3)

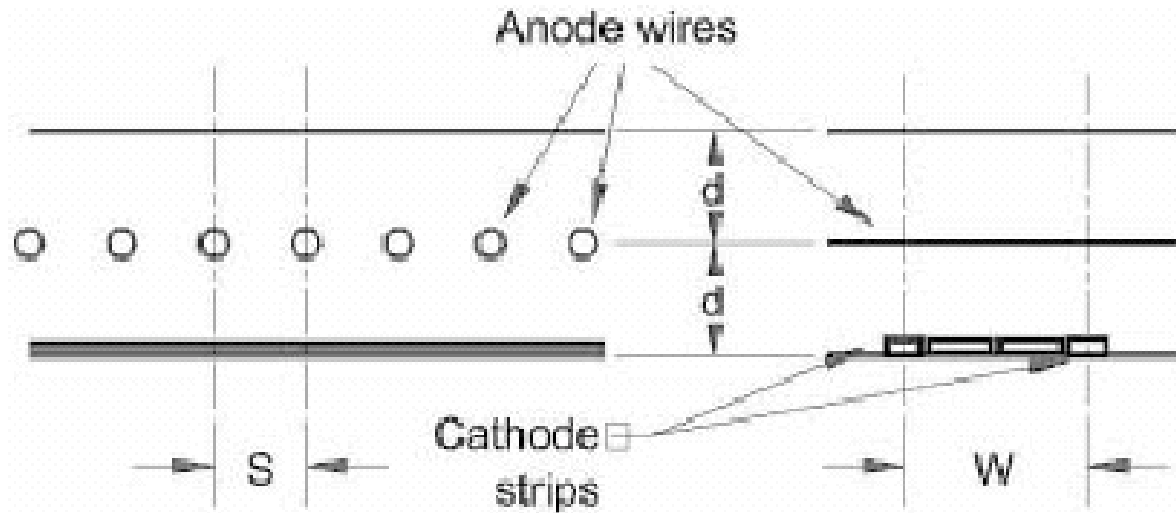
Gas: Ar/CO₂ (93%/7%) at 3 bar

Gas gain: 2×10^4 at 3.1KV

2 multilayers of 3 or 4 monolayers



ATLAS τ tracking: Cathode Strip Chambers



Gas gap : 5.08 mm
Anode wire pitch : 2.54 mm
Cathode read-out pitch: 5.08mm
Maximum drift time: 30ns
Gas mixture: Ar-CO₂-CF₄
(30%/50%/20%)

Risoluzione spaziale: 50 μ m

ATLAS □ trigger: Resistive Plate Chambers

RPC:

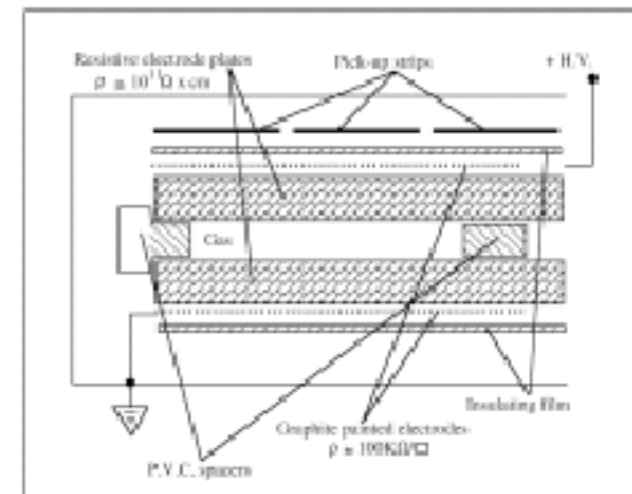
Gas gap: 2 mm

Bakelite plates: 2 mm, $\rho \approx 2 \times 10^{10} \Omega \times \text{cm}$

Gas working mode: avalanche

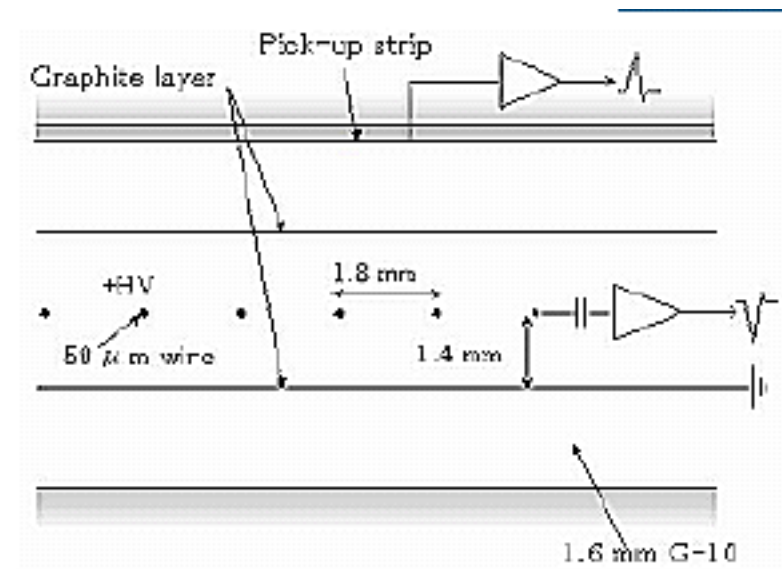
Gas mixture: $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 + \text{isoC}_4\text{H}_{10} + \text{SF}_6$

Time resolution = 1.5ns



ATLAS \square trigger: Thin Gap Chambers

Gas gap : 2.8 mm
Anode wire pitch : 1.8 mm
HV: 3.0 KV
Gas gain: 10^6
Gas mixture : $\text{CO}_2 / \text{n-C}_5\text{H}_{12}$ (55%/45%)



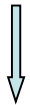
ATLAS: risoluzioni

Il campo magnetico toroidale $e' \sim$ sempre perpendicolare alla traiettoria dei muoni
 Magnete = “*air core magnet*”

Risoluzione per $|\eta| < 1.05$

2 % @ 100 GeV

8 % @ 1 TeV



Risoluzione in massa:

1.6 % @ 100 GeV

2.6 % @ 1 TeV

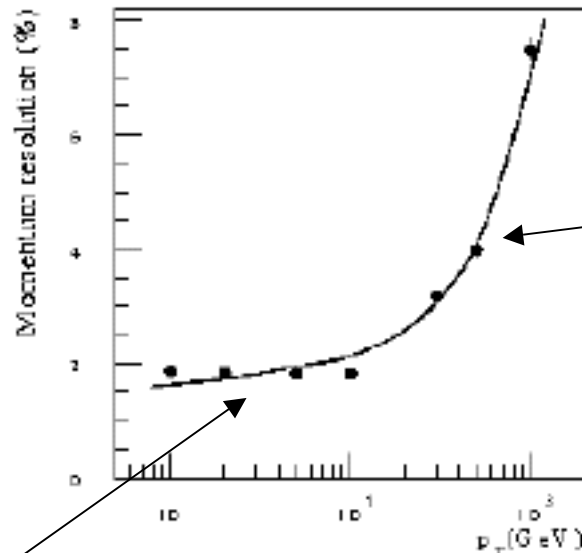


Figure 10: Momentum resolution for muons (see text)

Multiple scattering

traking

8 - Lettura segnale

Per gli scintillatori e i rivelatori a Cherenkov si usano i PMT (fotomoltiplicatori)

Per le camere a gas si usa la “solita” catena di amplificazione del segnale (pre-ampl, ampl)

Per le camere a drift si usano i Time Digital Converter (TDC) :

⇒ di opportuno numero di canali per avere la risoluzione voluta

9 - Calibrazioni

- Del campo magnetico B : “*hall probes*”
- Dell’elettronica: con segnali di test (ES: impulsatori o fasci laser)
- Con le camere a filo e’ indispensabile **conoscere bene la posizione dei fili segnale,** che puo’ cambiare:
 - con variazioni di temperatura
 - con piccoli movimenti di assestamento delle camere o dei supporti
 -

La misura delle posizioni:

assolute

relative

si fa:

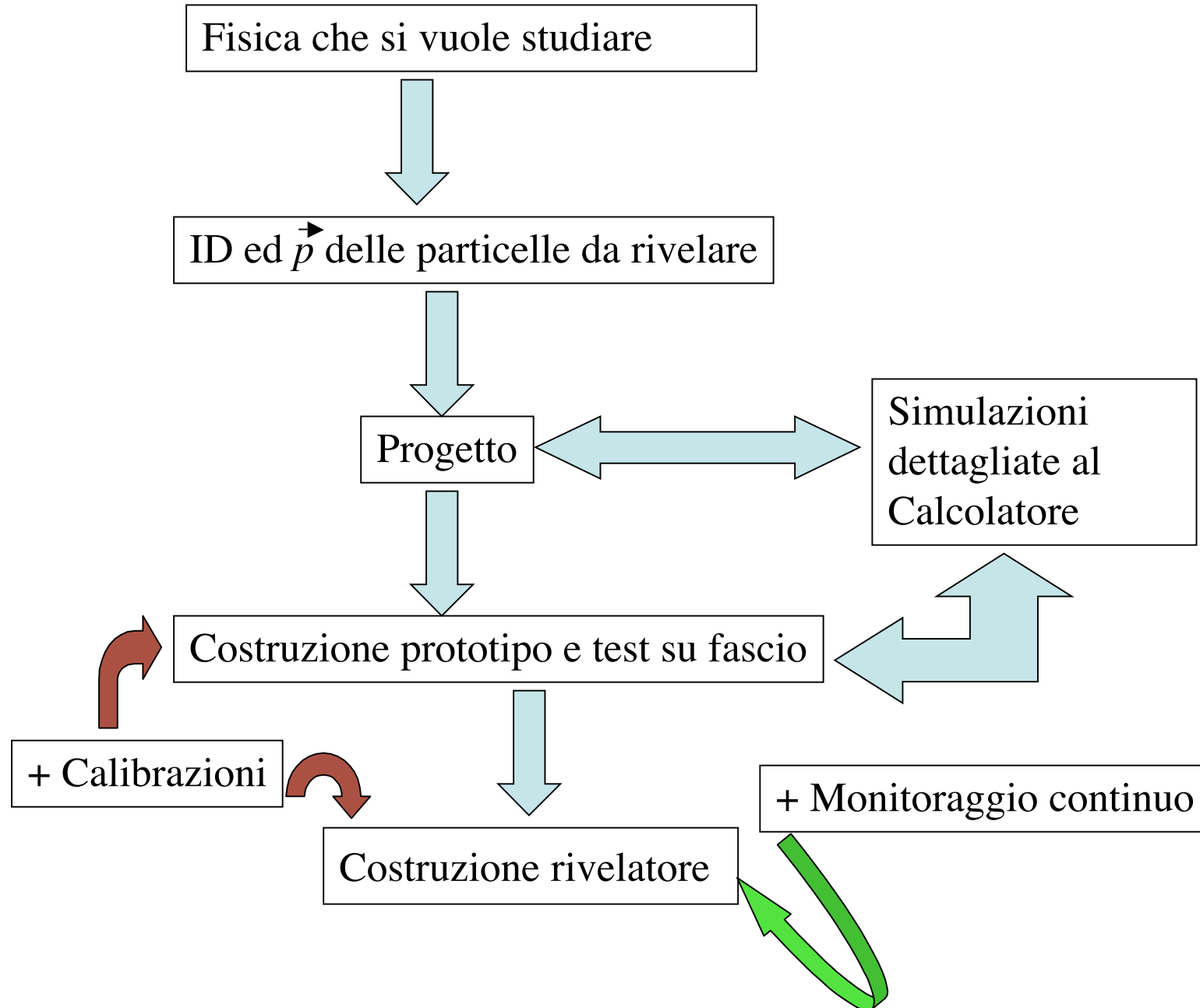
con misure ottiche (durante la costruzione e l’assemblaggio)

su fasci di test

durante la presa dati (ES: con muoni cosmici o fasci dedicati)

10 - Controllo stabilità

- Del campo magnetico B : “*hall probes*”, misure del momento sui cosmici
- ⇒ • Del gas (molto importante per camere a drift) : composizione miscela ; flusso
- Dell’elettronica: impulsi dedicati, fasci laser,..
- Della posizione: tracce dei cosmici, sensori e misuratori di movimenti,...



Solo cosi' si ottiene buona fisica !!!!!!!!

(buon lavoro!)