

**Cargèse - 25 au 31 mars 2007**

**Ecole des techniques de base  
des détecteurs**

**Pascal Vincent  
Université Pierre et Marie Curie  
LPNHE, Paris**





# Les systèmes de détection

# Types de détecteurs

- On peut les classer suivant :
  - L'interaction
  - Le milieu détecteur
  - La fonction attendue pour la physique (mesure de grandeurs physiques)

# Suivant la fonction

## La position :

- Les scintillateurs
- Compteurs proportionnels
- Chambres à dérive
- Les dét. à radiation de transition
- Chambre à décharges
- Les émulsions nucléaires
- Les semi-conducteurs

## Energie et impulsion :

- Les scintillateurs
- photomultiplicateurs
- Les semi-conducteurs
- bolomètres
- Détecteurs Cherenkov
- Calorimètres et spectromètres (champs magnétiques)

## Identification :

- Imageurs Cherenkov
- Les chambres d'ionisation
- Systemes

## Comptage :

- Les Geiger Muller
- Compteurs Cherenkov
- Les scintillateurs
- photomultiplicateurs

# Mesure de la position

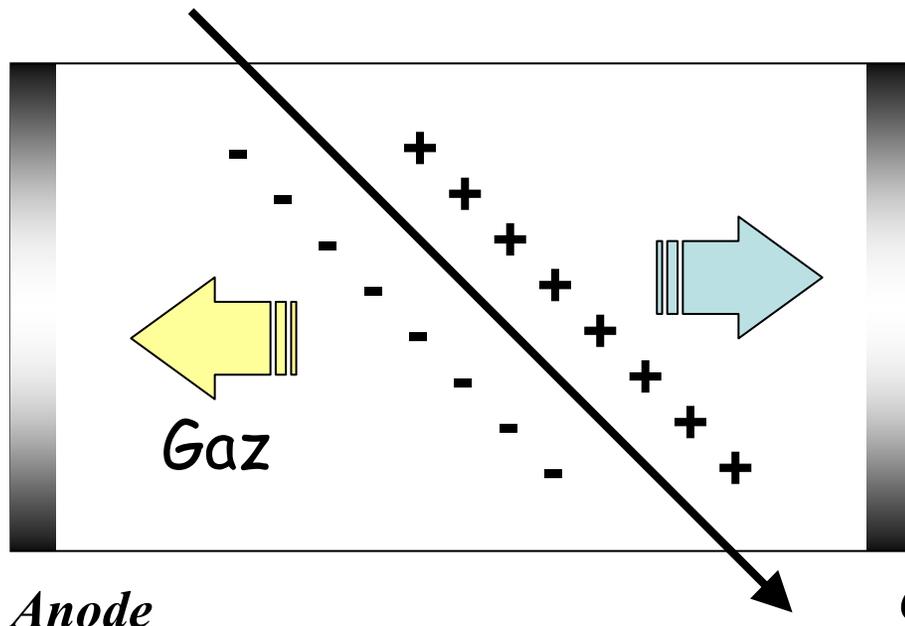
# Chambre d'ionisation

Ionisation d'un milieu gazeux :

$$\Delta E = \int_x^{x+dx} -\frac{dE}{dx} dx$$

Sur une distance de détecteur  $dx$  une particule chargée perdra une énergie  $\Delta E$ .

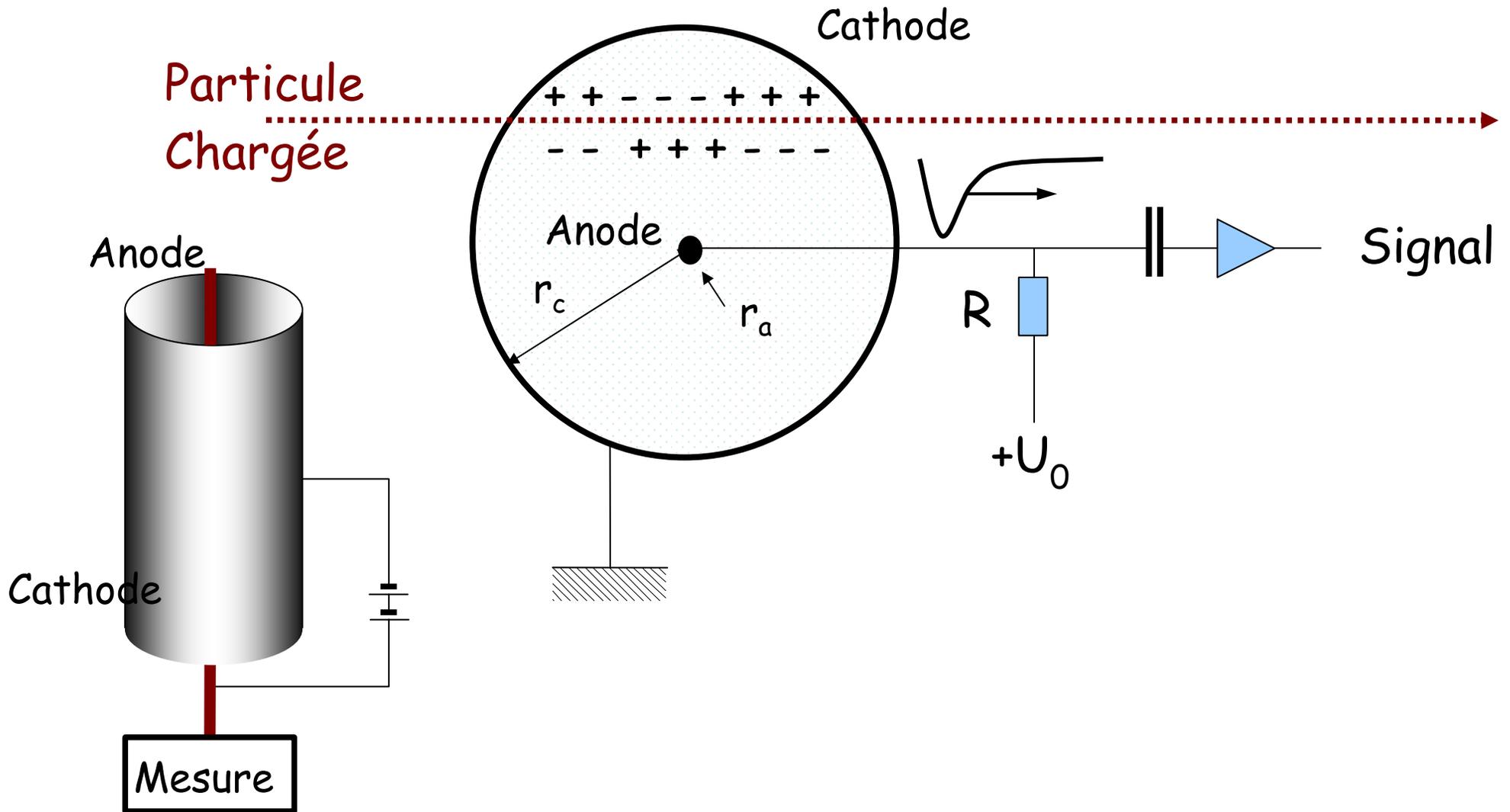
☛ cette particule ionise le milieu et le nombre moyen de charges positives et négatives créées dépend du potentiel d'ionisation  $W$  caractéristique du milieu :



$$n_o = \frac{\Delta E}{W} \Rightarrow Q = -en_o$$

Gaz	W (eV)
Air	35,0
Argon	26,6
BF <sub>3</sub>	33,8

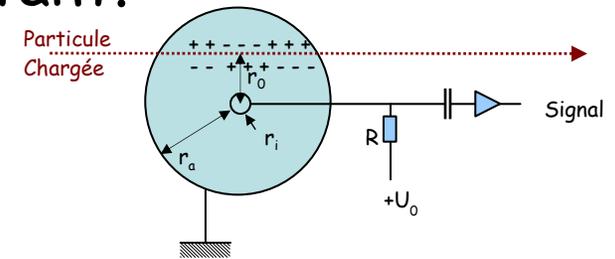
# Mesure de la position dans une chambre proportionnelle



# Mesure de la position dans une chambre proportionnelle

- Contrairement aux chambres d'ionisations, le champ électrique dans la chambre n'est pas constant.

$$\vec{E}(r) \propto U_0 \cdot \frac{1}{r}$$



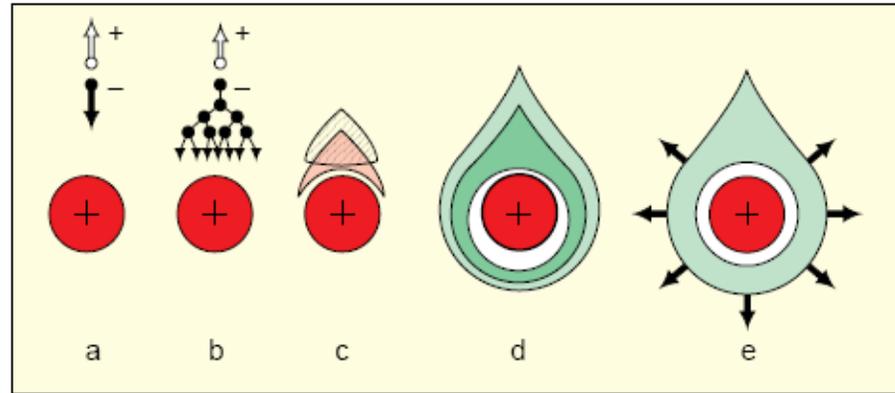
- Aux voisinages de l'anode le champ diverge. La particule est fortement accélérée. Elle gagne de l'énergie.

$$m\vec{a} = \vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow F(r) \propto \frac{1}{r} \nearrow r \searrow$$

# Mesure de la position dans une chambre proportionnelle

$$Q = -e \cdot n_0 \cdot A$$

$$\propto E$$

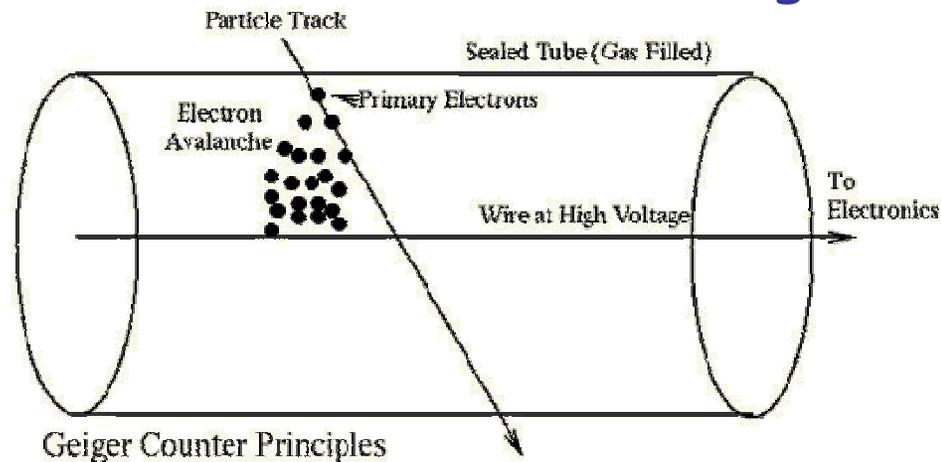


Le facteur  $A$  est le **facteur de multiplication** de la chambre.  
 Une formule empirique est donnée par la relation :

$$\ln A = \frac{V}{\ln(r_a/r_i)} \frac{\ln 2}{\Delta V} \left( \ln \left[ \frac{V}{pr_i \ln(r_a/r_i)} \right] - \ln K \right) \Rightarrow \underline{\underline{A \propto e^V}} \quad !$$

# Mode d'avalanche

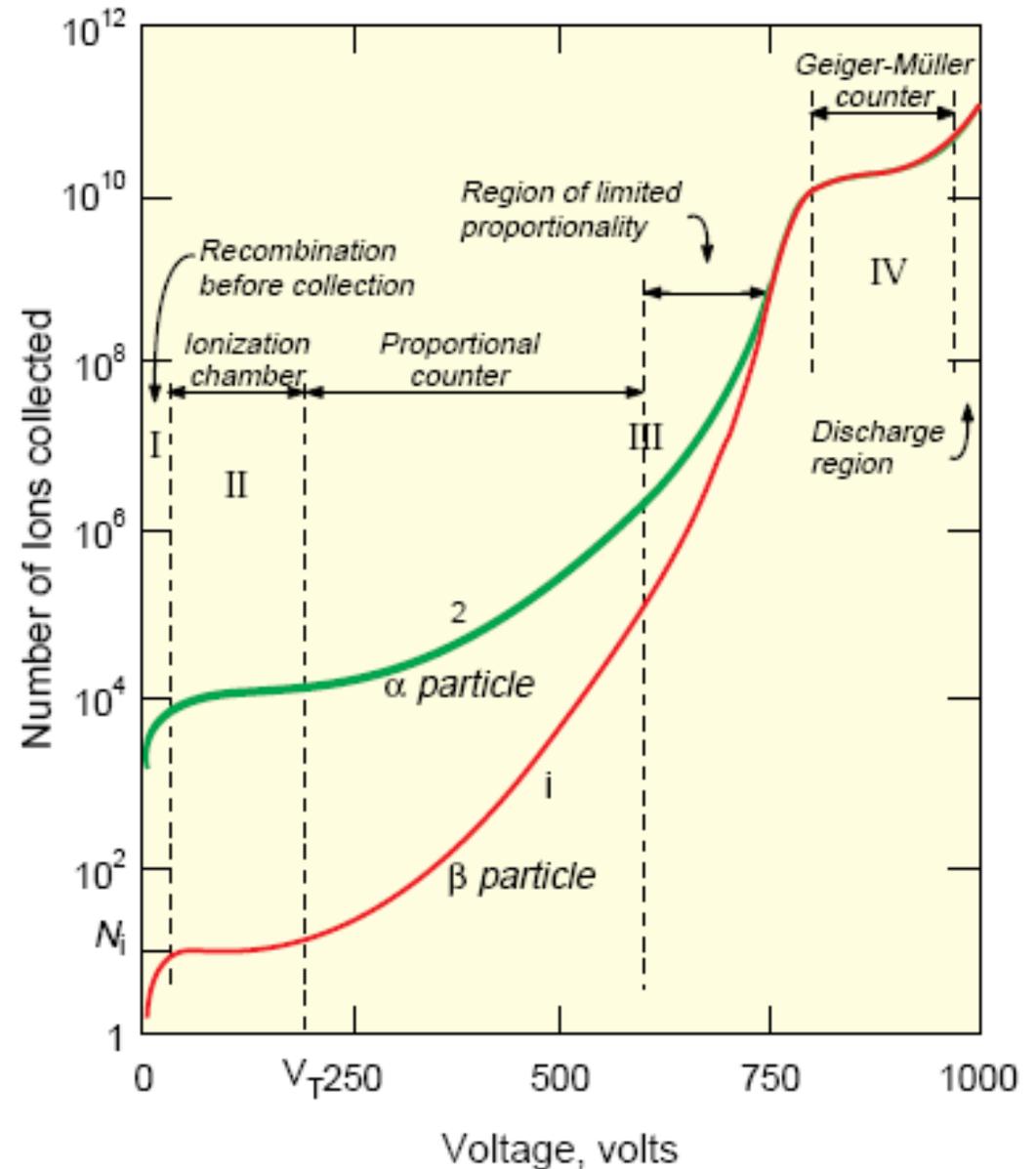
- Lorsque la tension augmente l'avalanche se développe dans tout le volume de la chambre : mode Geiger-Muller



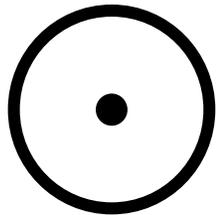
- La charge collectée ne dépend plus de l'énergie de la particule incidente. Le mode Geiger-Muller permet un comptage des particules.
- Un mode déclenché permet de retrouver cette proportionnalité (chambre à dard « streamer chamber »).

# Détecteurs à gaz

Les différents modes de fonctionnement d'une chambre à gaz en fonction de la tension appliquée

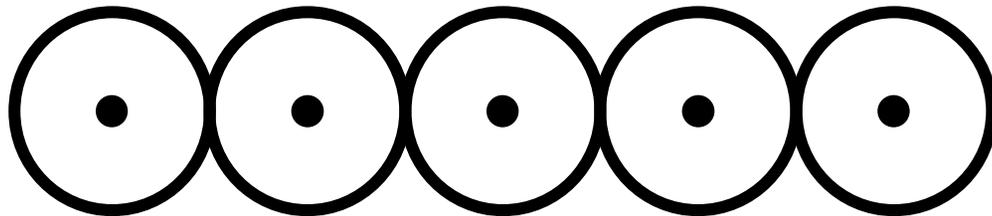


# Evolution des chambres

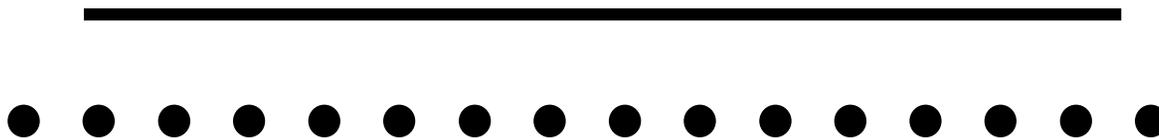


Compteur  
proportionnel

1 points dans l'espace

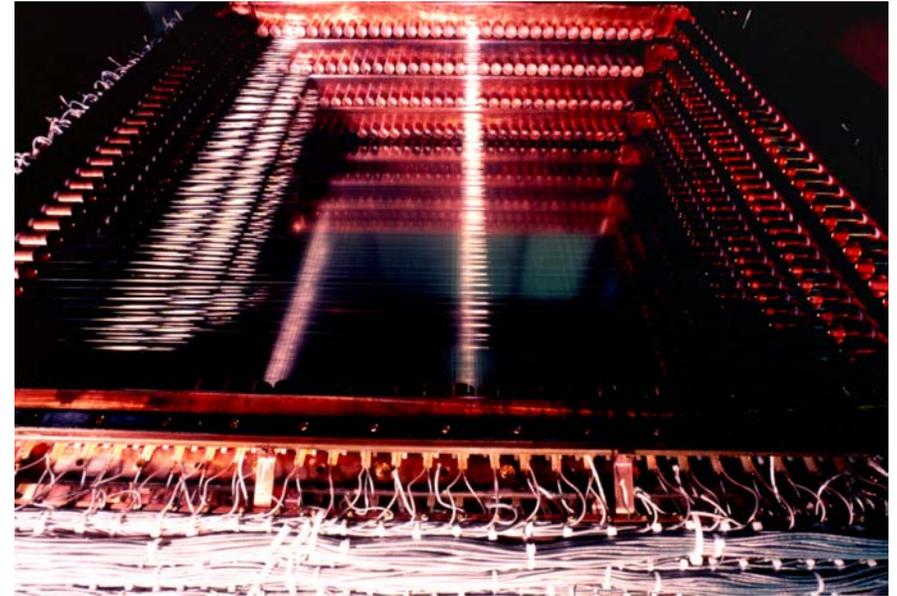
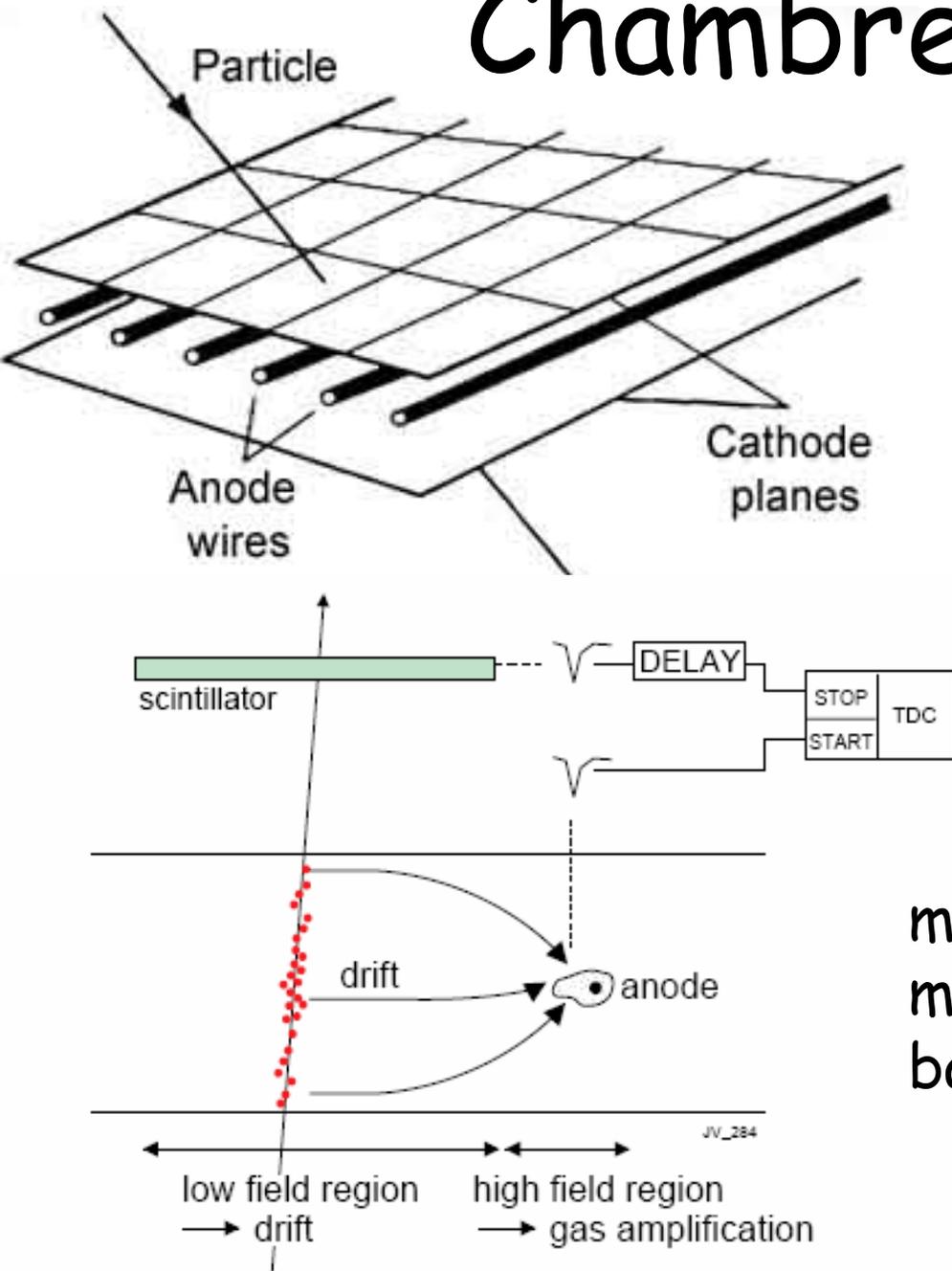


« n » points

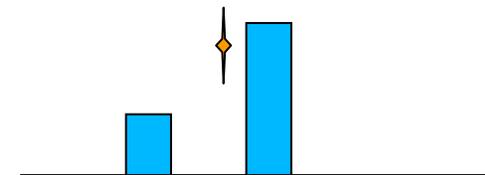


Chambre multi-fils proportionnel : MWPC

# Chambre multi-fils



meilleure résolution spatiale :  
méthode de reconstruction  
barycentrique.

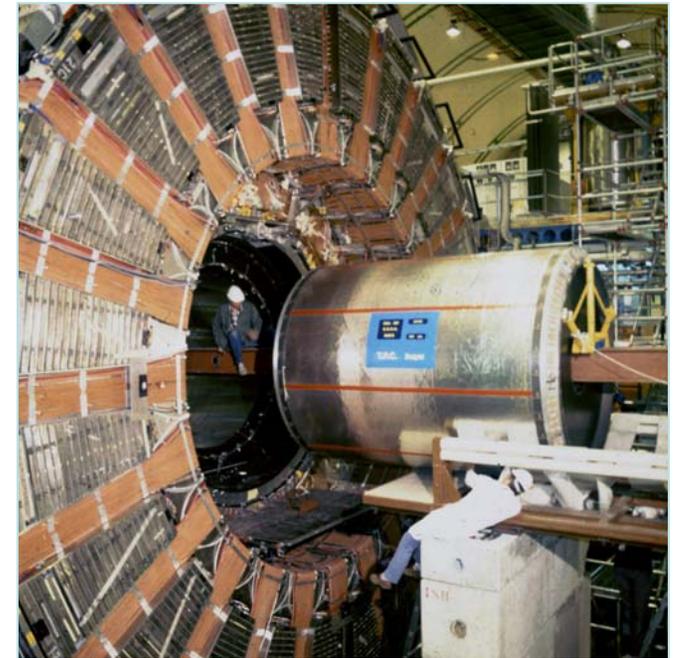
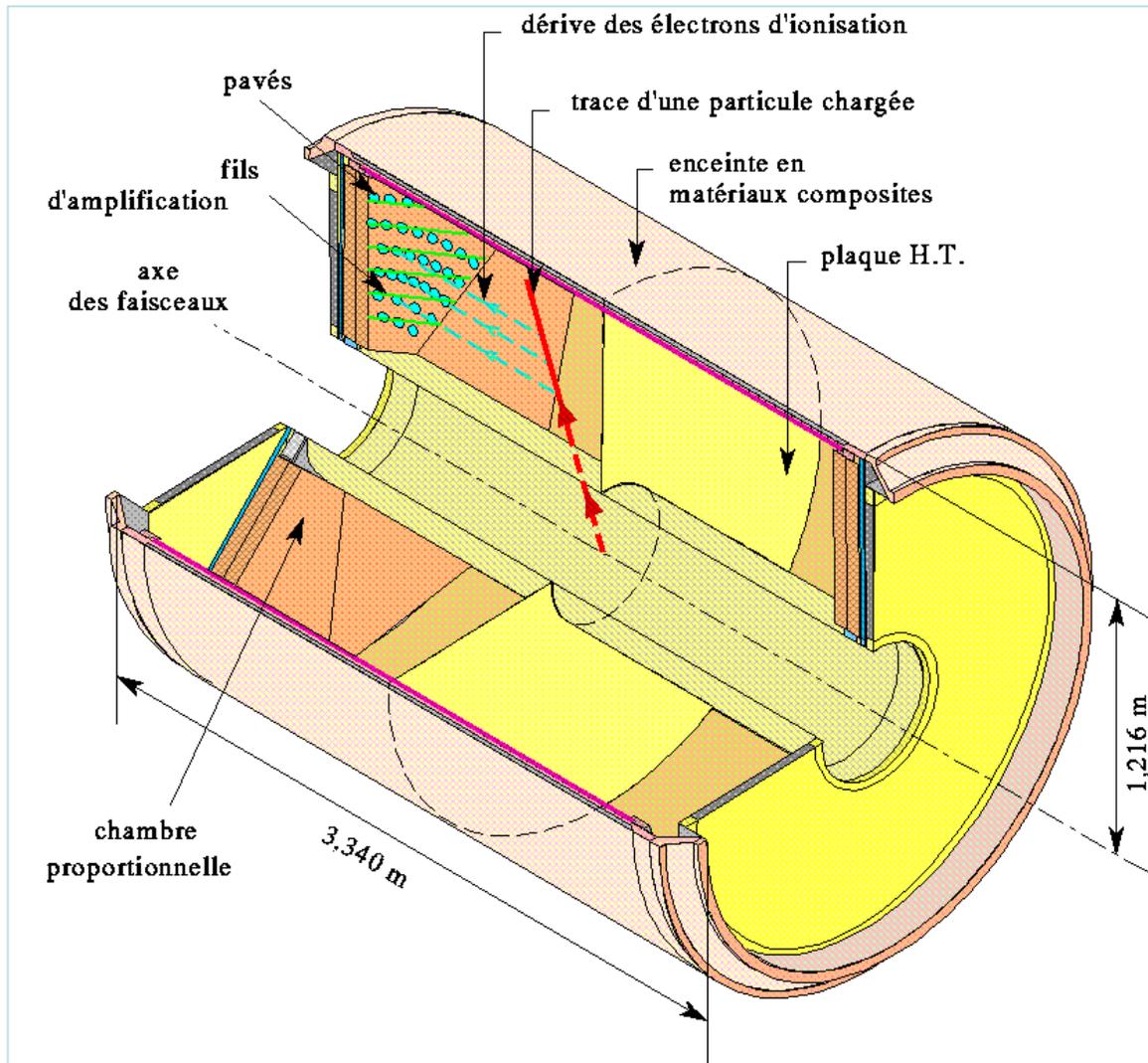


# Détecteurs à gaz

Les chambres à étincelles



# La chambre à projection temporelle

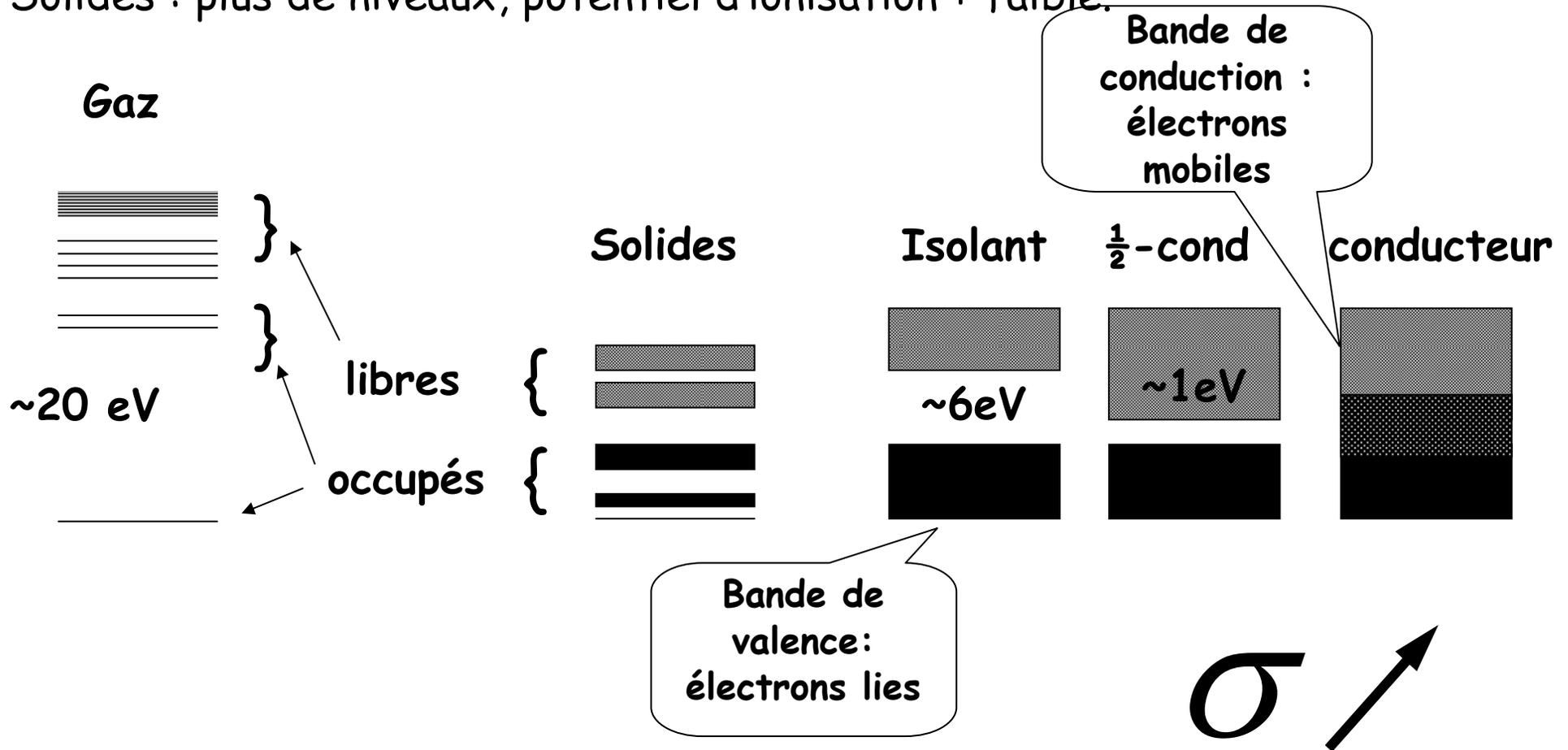


Chambre à projection temporelle de l'expérience DELPHI du CERN

# Détecteurs solides

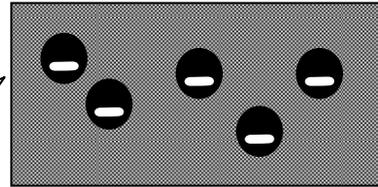
# Ionisation et excitation

Gaz rares : ionisation assurée mais potentiel important.  
Solides : plus de niveaux, potentiel d'ionisation + faible.

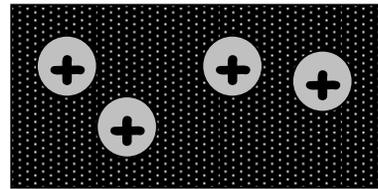


# Les semi-conducteurs

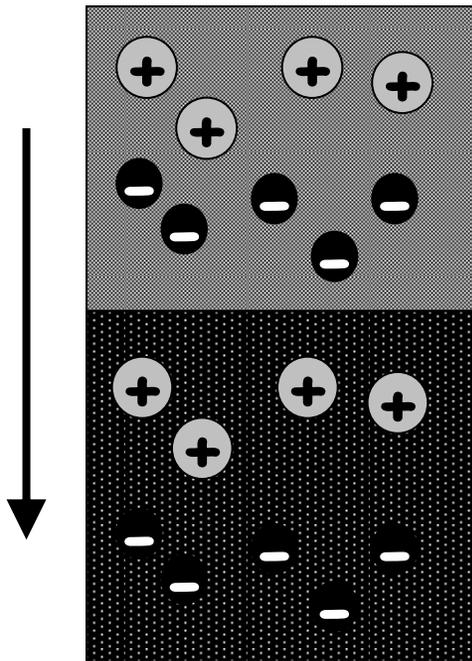
Dopage N: donneur en charges négatives



Dopage P: receveur de charges négatives

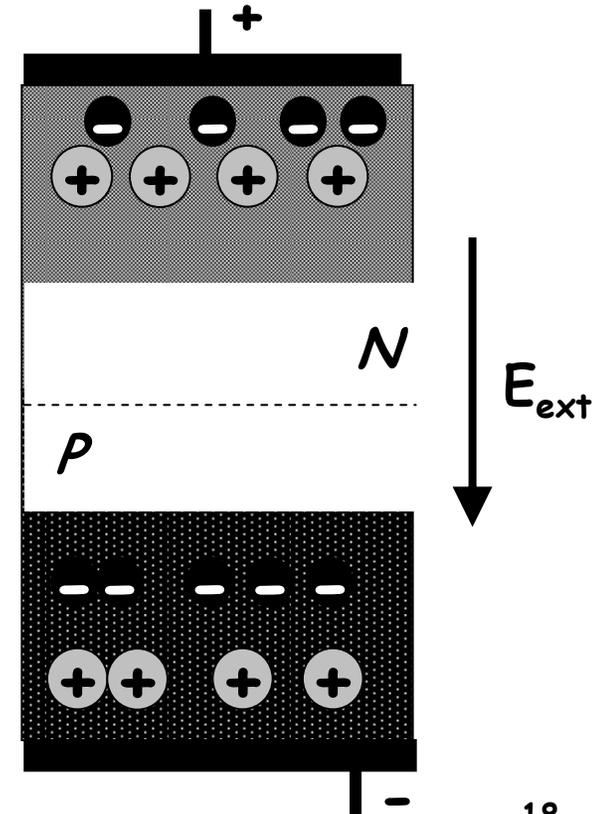
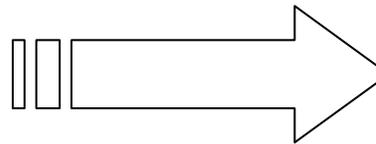


migration des charges négatives



Application d'un champ externe : création d'une zone déplétée

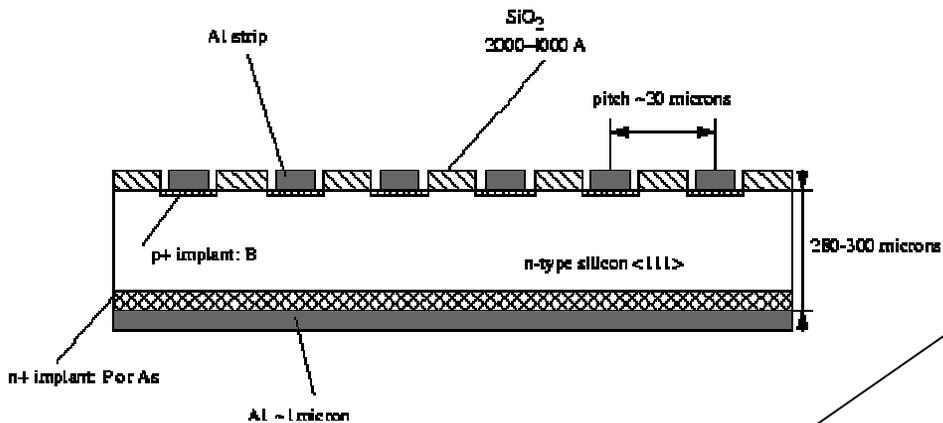
$E_{int}$



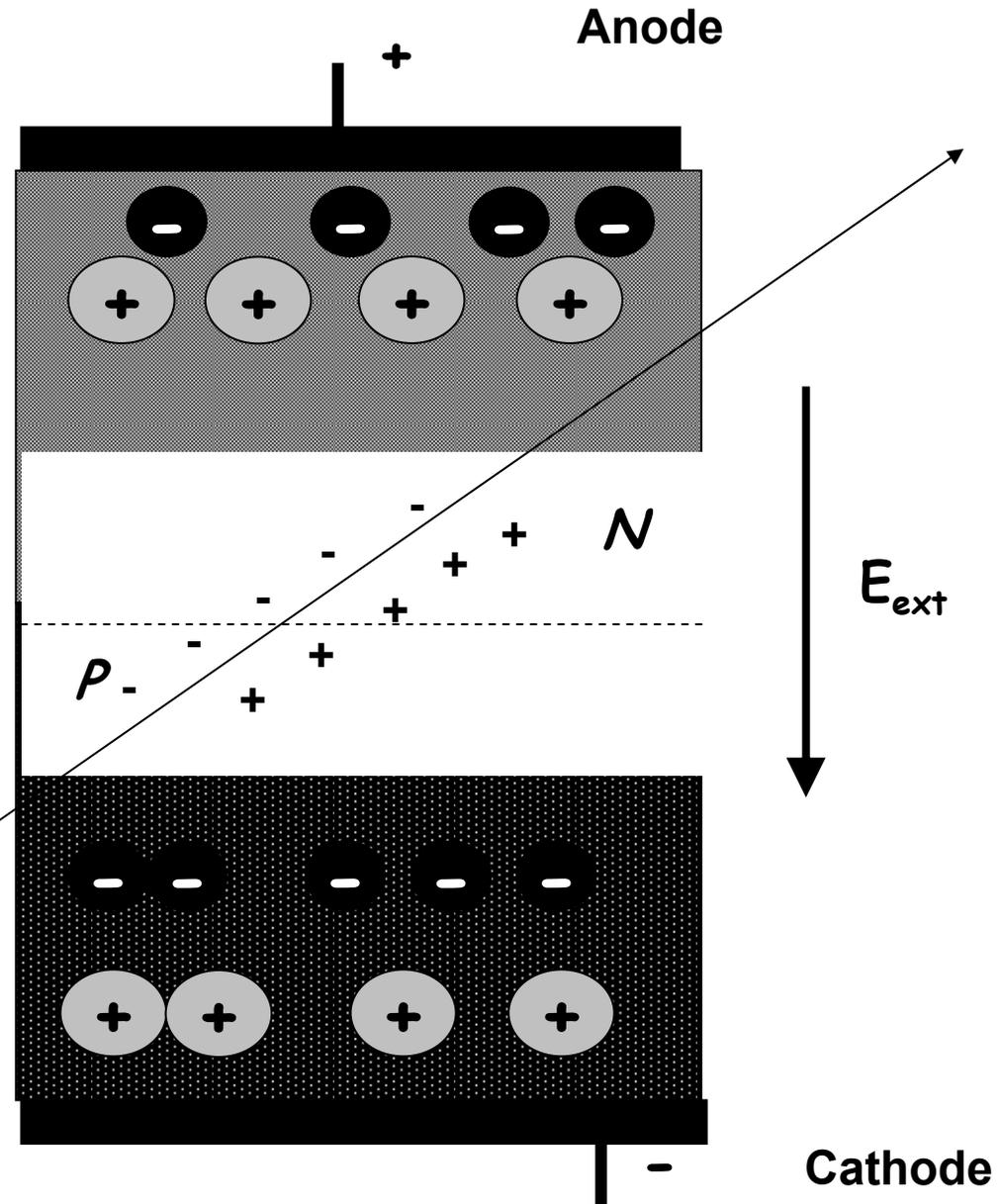
# Principe d'une jonction

Une Particule chargée ionise le milieu déplété.

Les charges négatives sont collectées par l'anode et produisent un signal détectable.



Détecteur rapide et de bonne résolution spatiale.





# Détermination de la charge et de l'impulsion

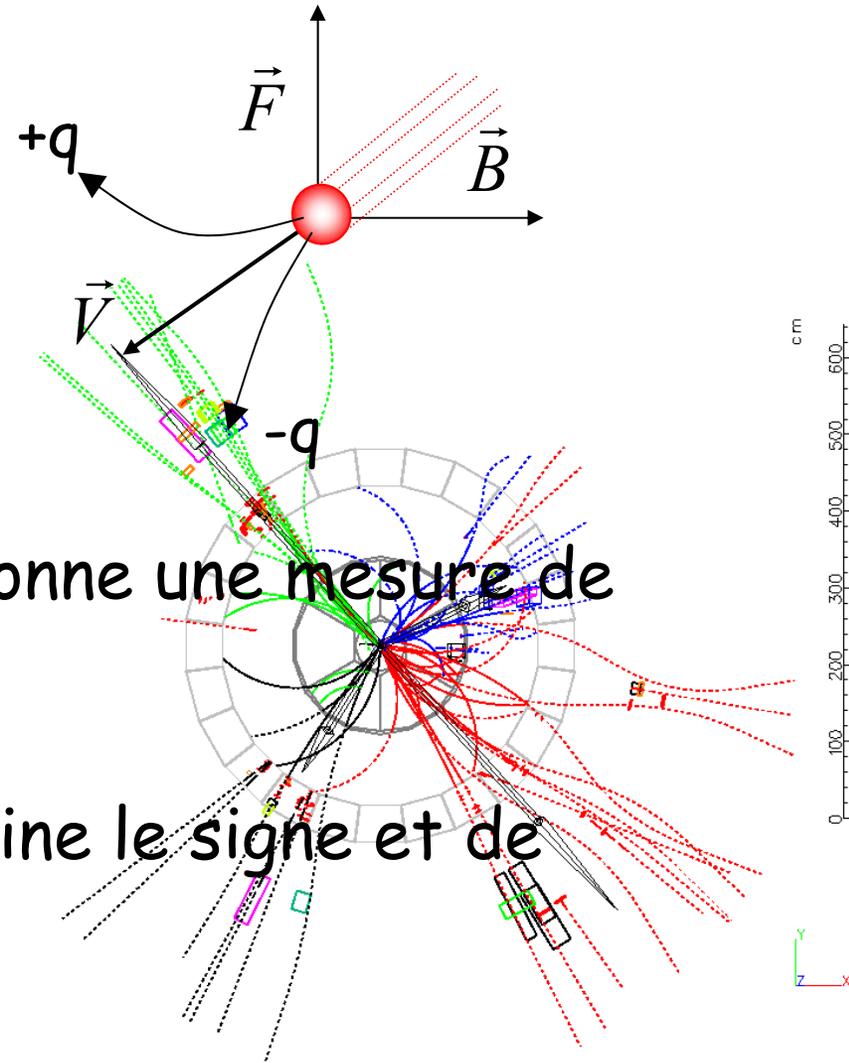
# Détermination de la charge et l'impulsion

- Il faut reconstruire la trajectoire de la particule dans un champ magnétique :

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{V^2}{R} \vec{i} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$$

$$\Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{P}{qB}$$

- La courbure de la trajectoire donne une mesure de l'impulsion
- Les sens de la courbure détermine le signe et de charge



# Mesure de l'énergie

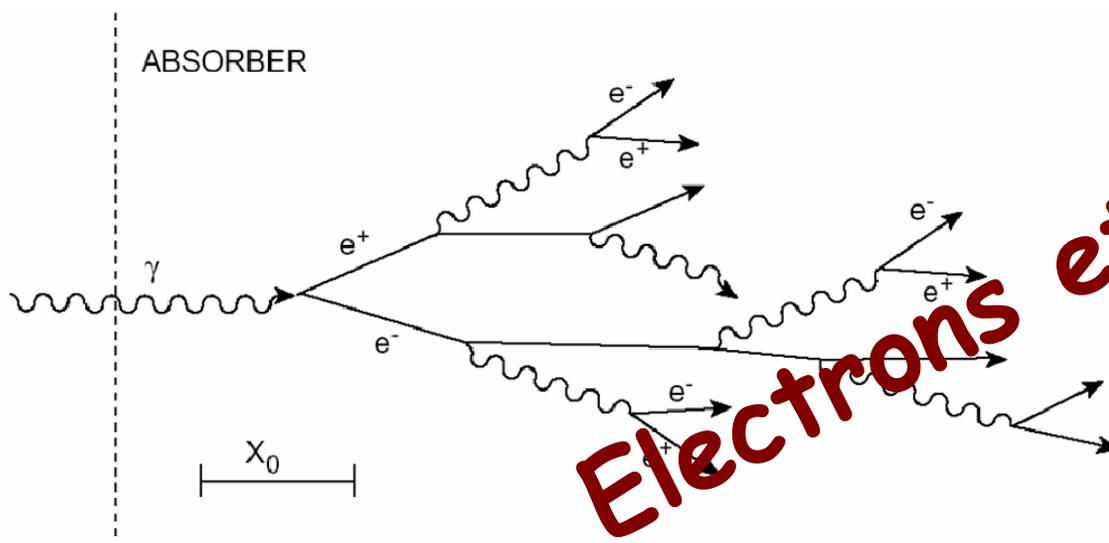


# Gerbes électromagnétiques

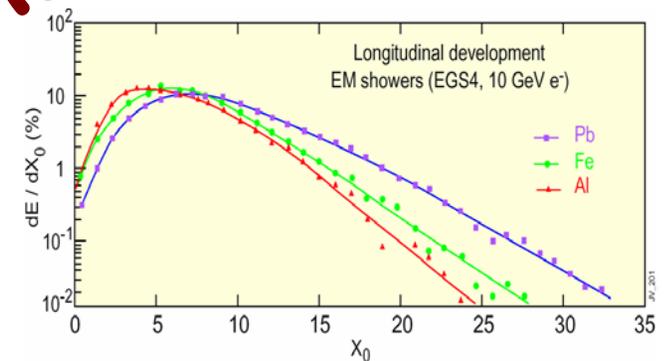
À haute énergie (GeV), les électrons perdent leurs énergies presque exclusivement par **rayonnement de freinage** et les photons perdent les leurs par **production de paire**. Le seuil correspond à l'énergie critique définie par :

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{ion}} \sim 1$$

La combinaison de ces deux effets résulte en la formation d'une **gerbe électromagnétique** quand un électron ou un photon entre dans un milieu dense.

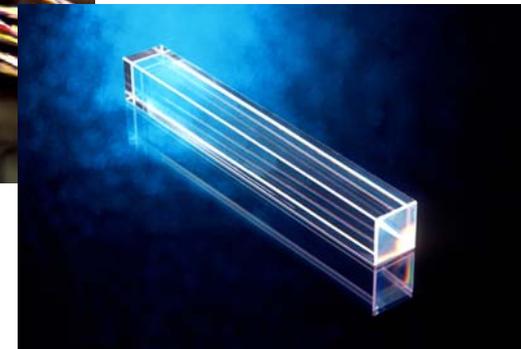
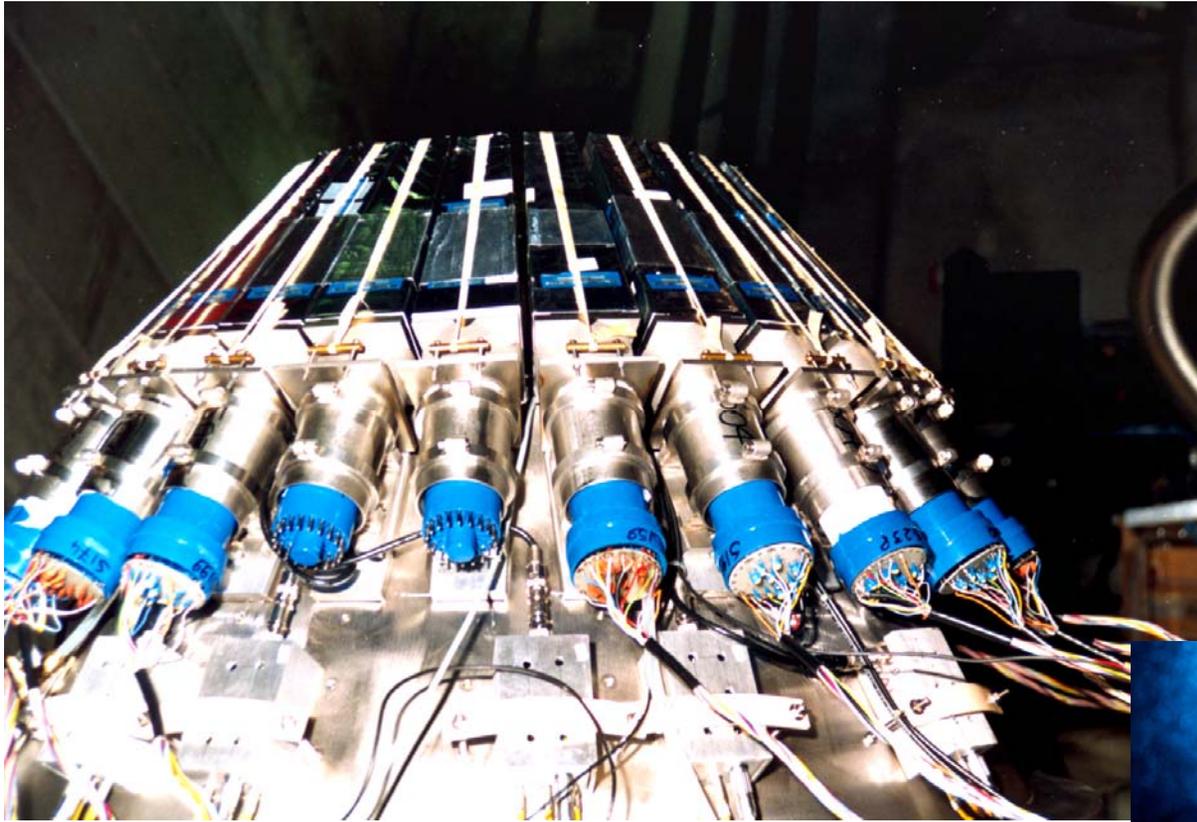


**Electrons et photons**

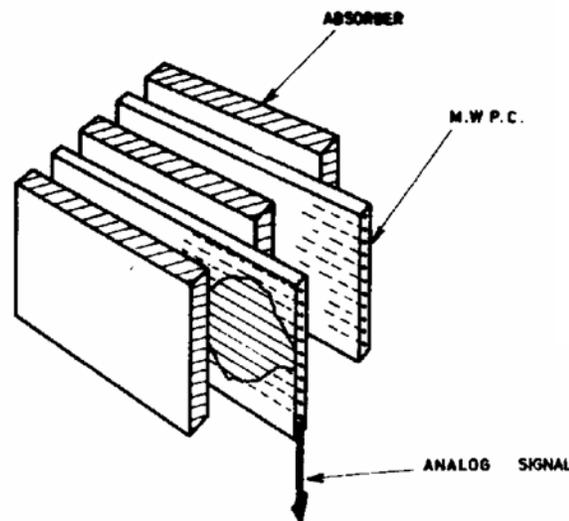
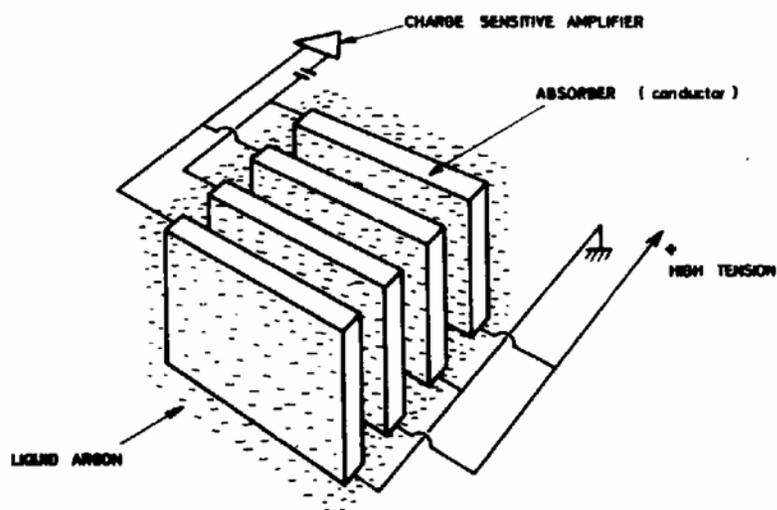
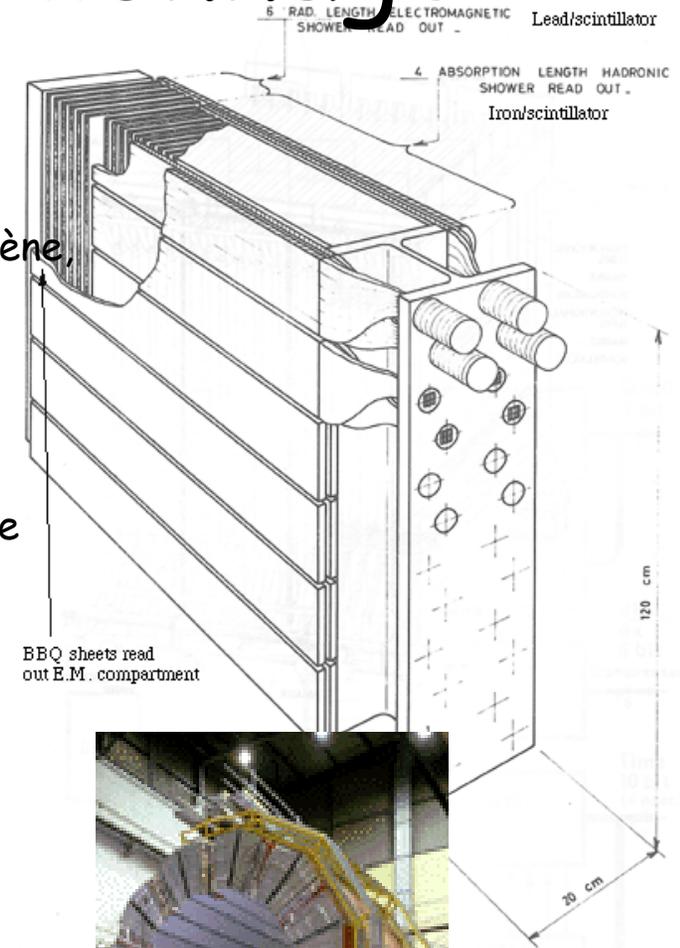
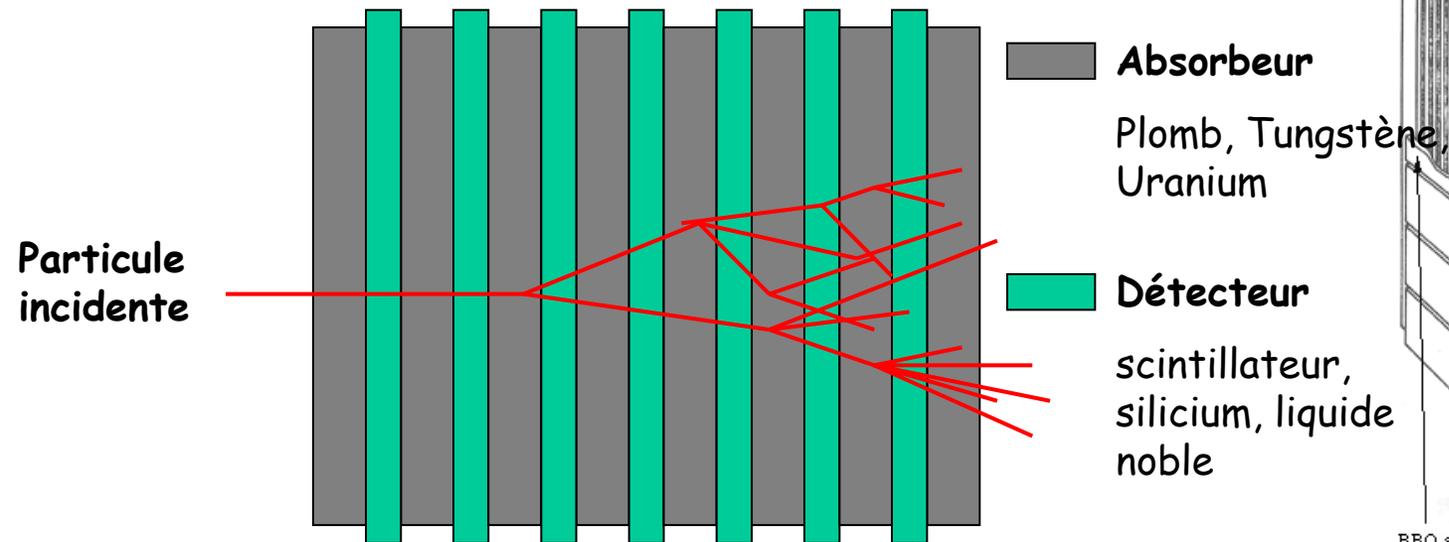




# Détecteurs homogènes



# Détecteurs à échantillonnage

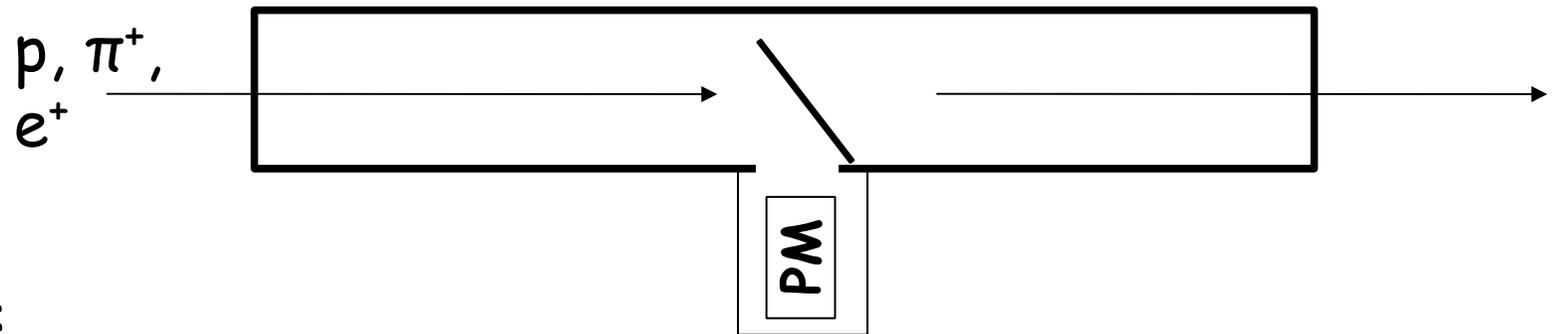


# Identification des particules

# Compteur Cherenkov à seuil

- Il donne un signal seulement pour les particules dont  $\beta > \beta_{th}$
- Il sont utilisés, par exemple, pour identifier un certain type de particule dans un faisceau mixte
- Dans le cas d'un milieu gazeux, l'indice de refraction et donc le seuil peut être ajuster par control de la pression :

$$n = n_0 \cdot (P/P_0)$$

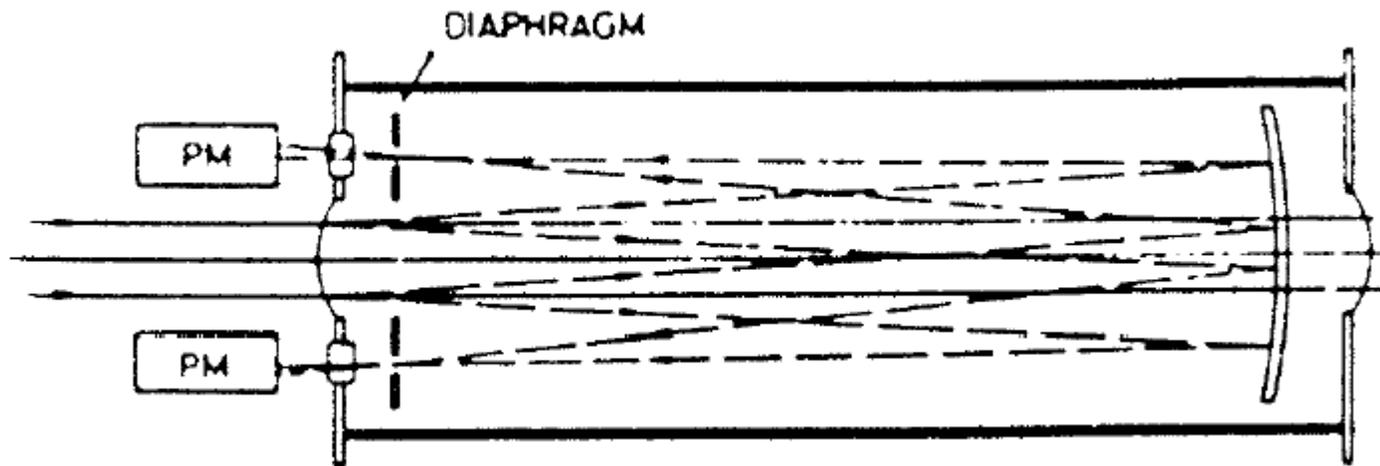


exemples :

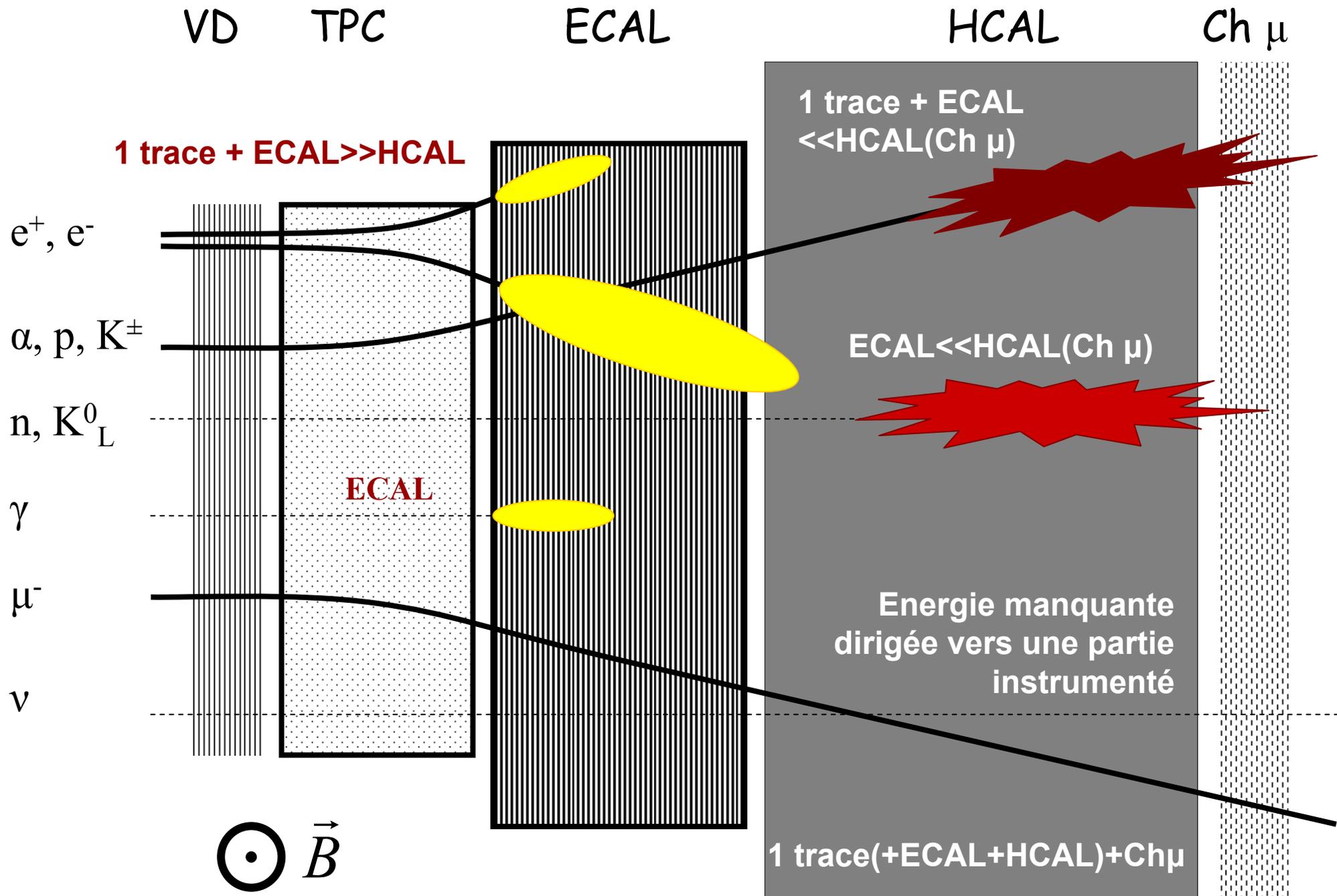
milieu	indice	$\rho$	p(938)	$\pi(139)$	e(0.511)
eau	1.33	1.52	1.4 GeV	211 MeV	776 keV
hélium	$1+4.3 \cdot 10^{-5}$	0.123	115 GeV	17. GeV	62.8 MeV

# Compteur Cherenkov différentiel

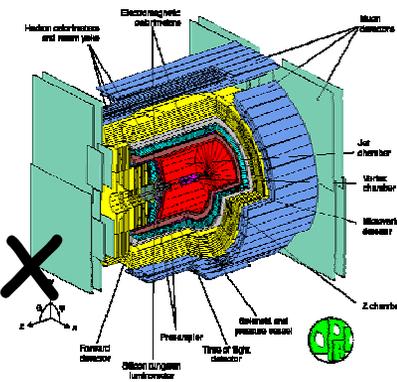
L'utilisation d'un miroir permet de sélectionner un intervalle en  $\beta$  (ce qui correspond, pour une impulsion donnée à un intervalle de masse).



L'angle d'émission de la lumière Cherenkov augmente avec l'énergie du faisceau.



# Reconstruction de vertex

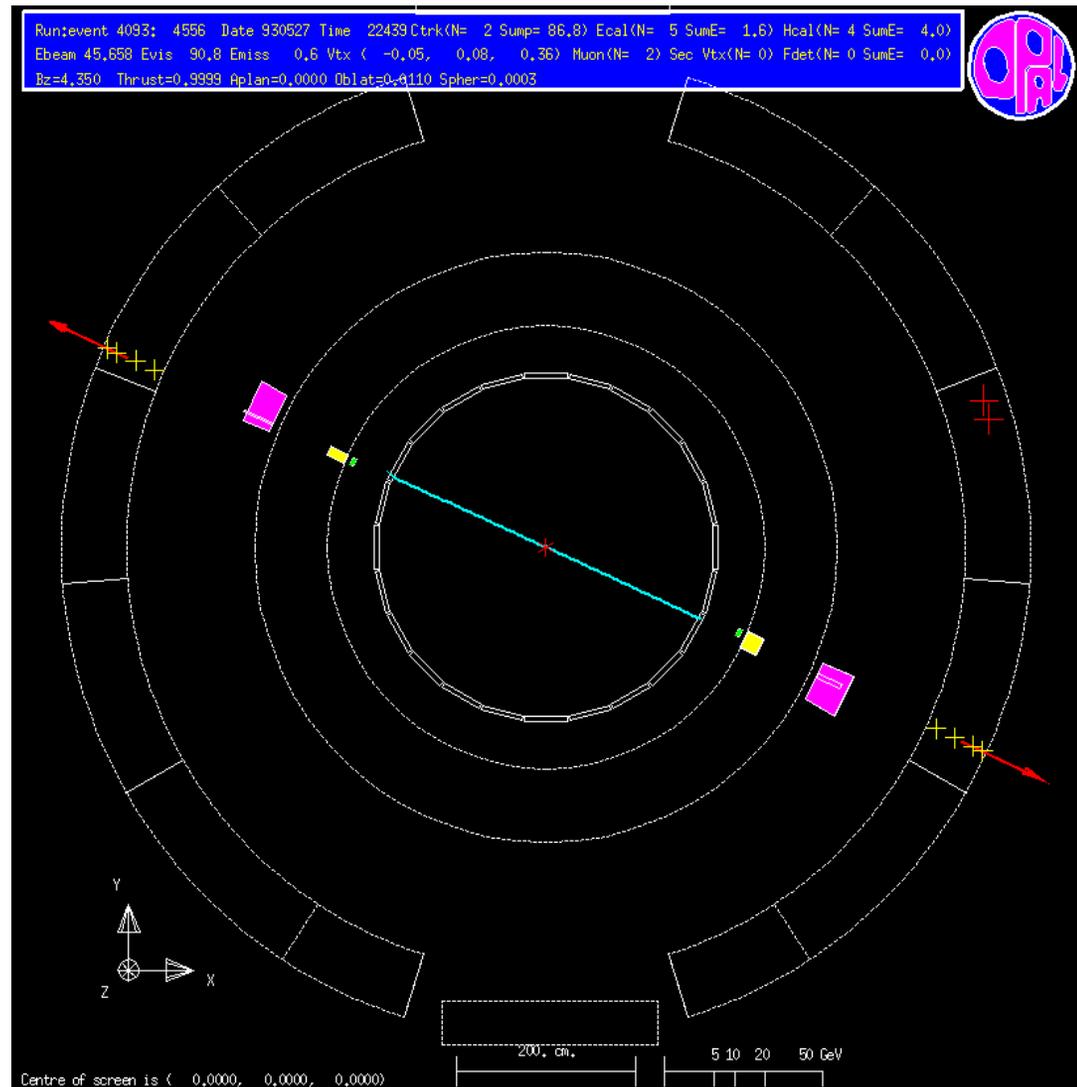
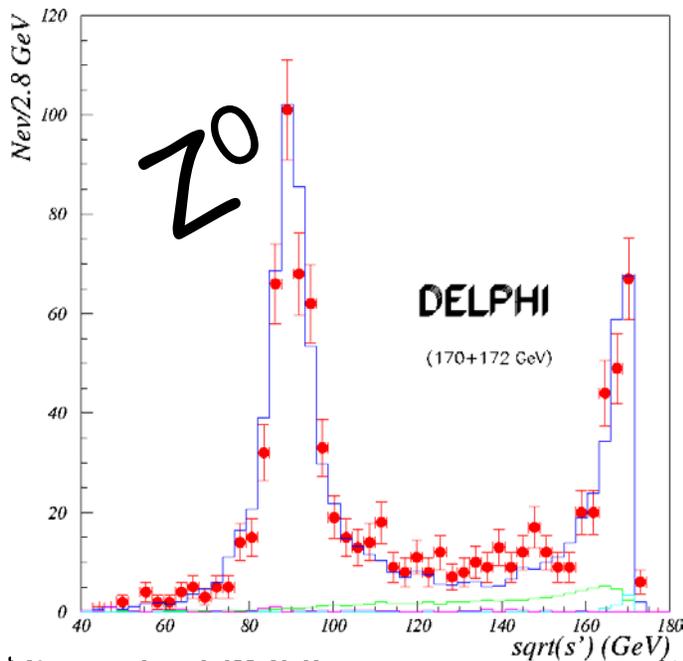


- $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

$$E_{CM}^i = E_{CM}^f$$

$$-m_Z^2 = (\vec{P}_{\mu^+} + \vec{P}_{\mu^-})^2 - (E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2$$

$$m_Z^2 = 4E_{\mu}^2 = 4(P_{\mu}^2 + m_{\mu}^2)$$



# Détecteur $4\pi$

