

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

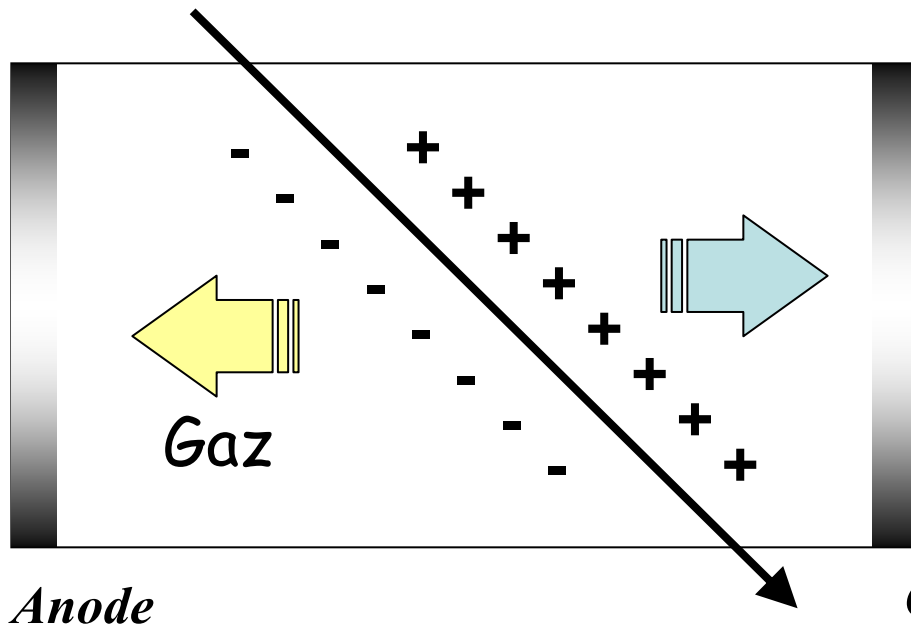
Chambre d'ionisation

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 ΔE .

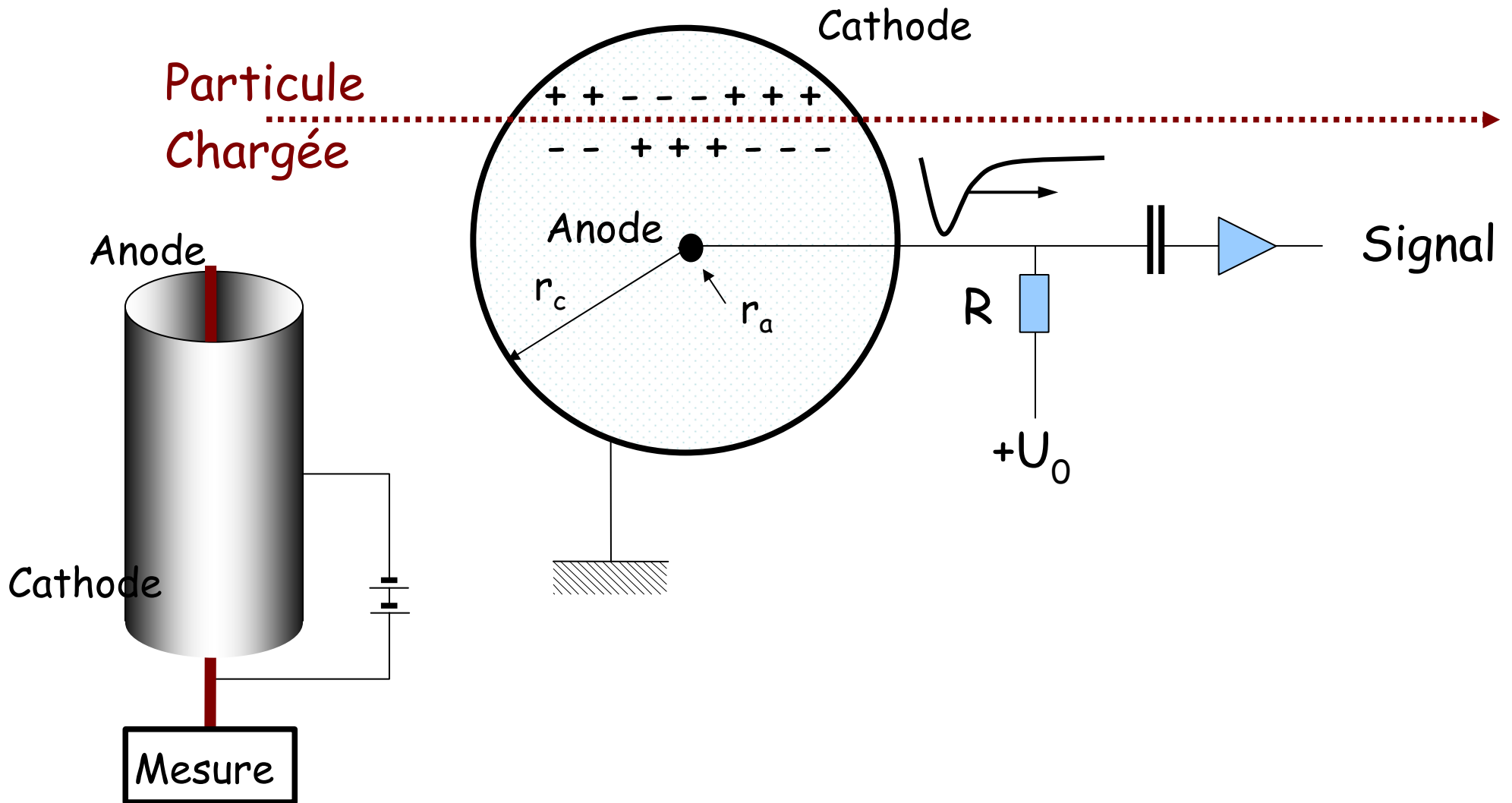
☛ cette particule ionise le milieu et le nombre moyen de charges positives et négatives créées dépend du potentiel d'ionisation W caractéristique du milieu :



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

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

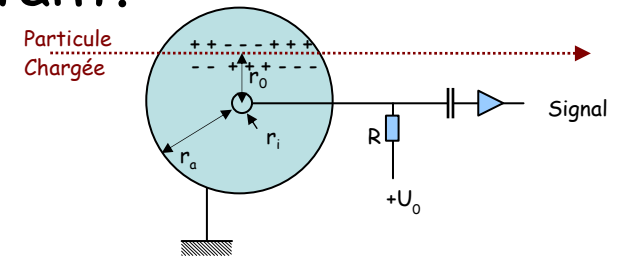
Mesure de la position dans une chambre proportionnelle



Mesure de la position dans une chambre proportionnelle

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

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



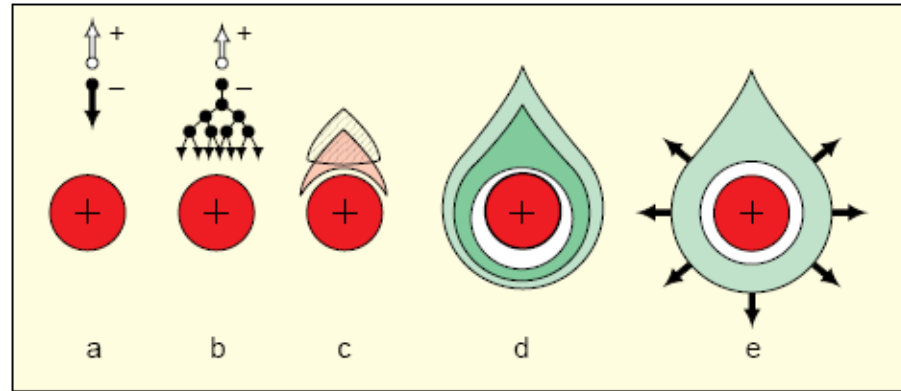
- Aux voisinages de l'anode le champ diverge. La particule est fortement accélérée. Elle gagne de l'énergie.

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

Mesure de la position dans une chambre proportionnelle

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

$$\propto E$$

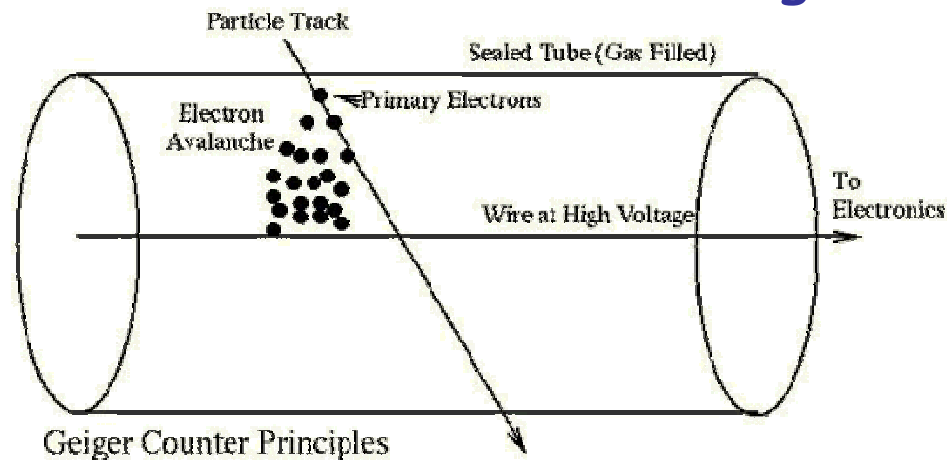


Le facteur A est le **facteur de multiplication** de la chambre.
 Une formule empirique est donnée par la relation :

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

Mode d'avalanche

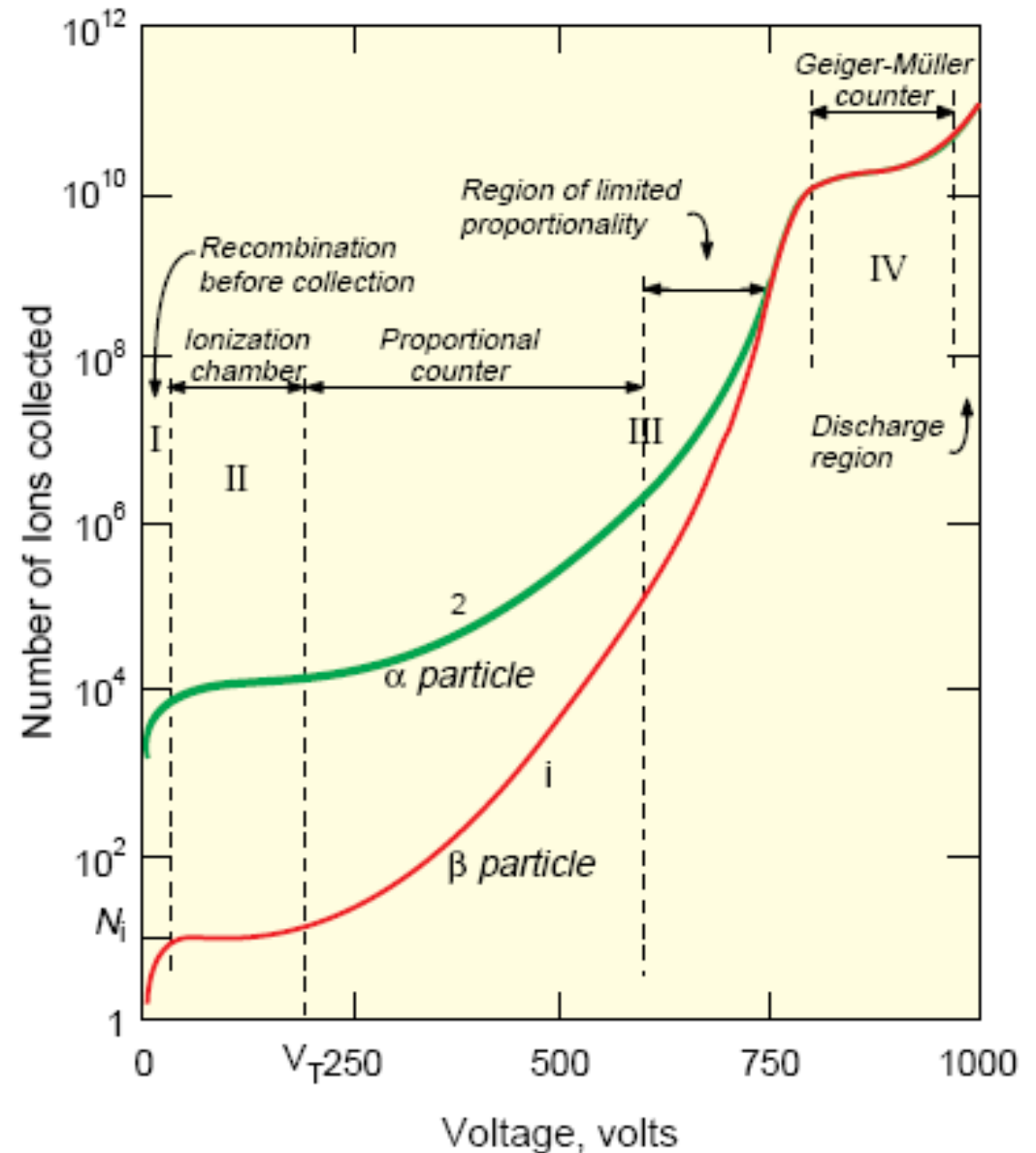
- Lorsque la tension augmente l'avalanche se développe dans tout le volume de la chambre : mode Geiger-Muller



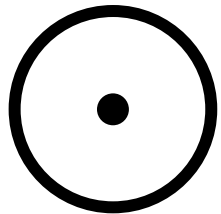
- La charge collectée ne dépend plus de l'énergie de la particule incidente. Le mode Geiger-Muller permet un comptage des particules.
- Un mode déclenché permet de retrouver cette proportionnalité (chambre à dard « streamer chamber »).

Détecteurs à gaz

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

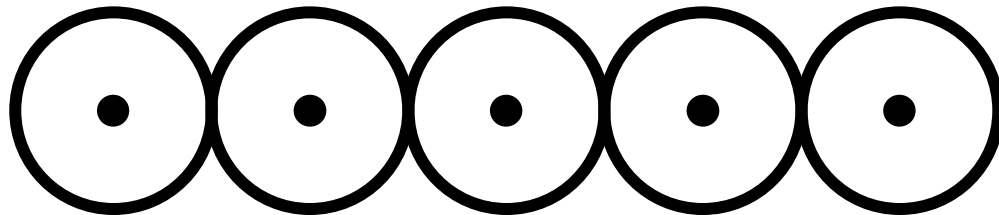


Evolution des chambres

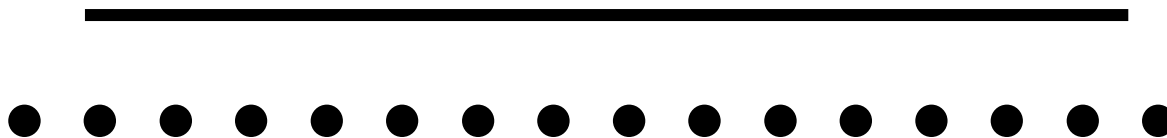


Compteur
proportionnel

1 points dans l'espace

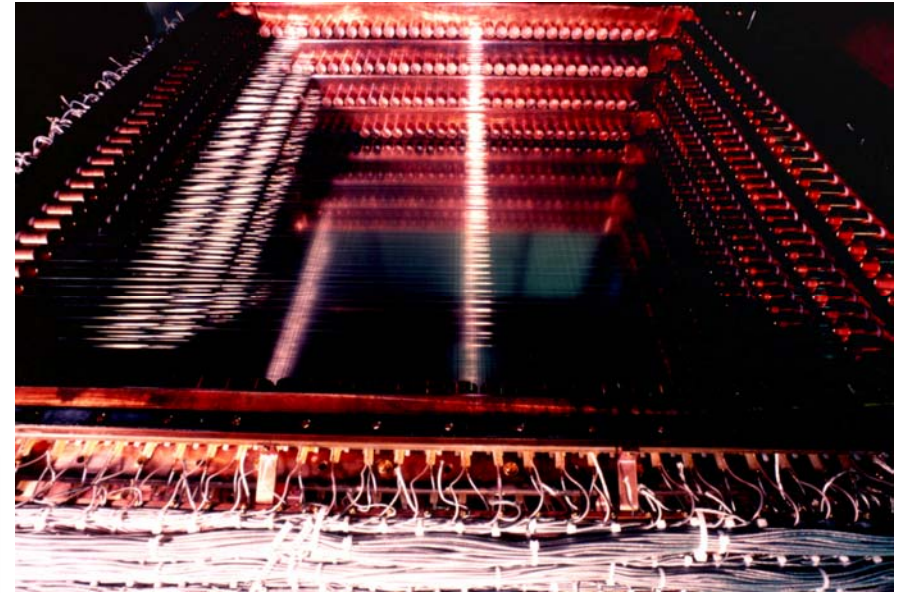
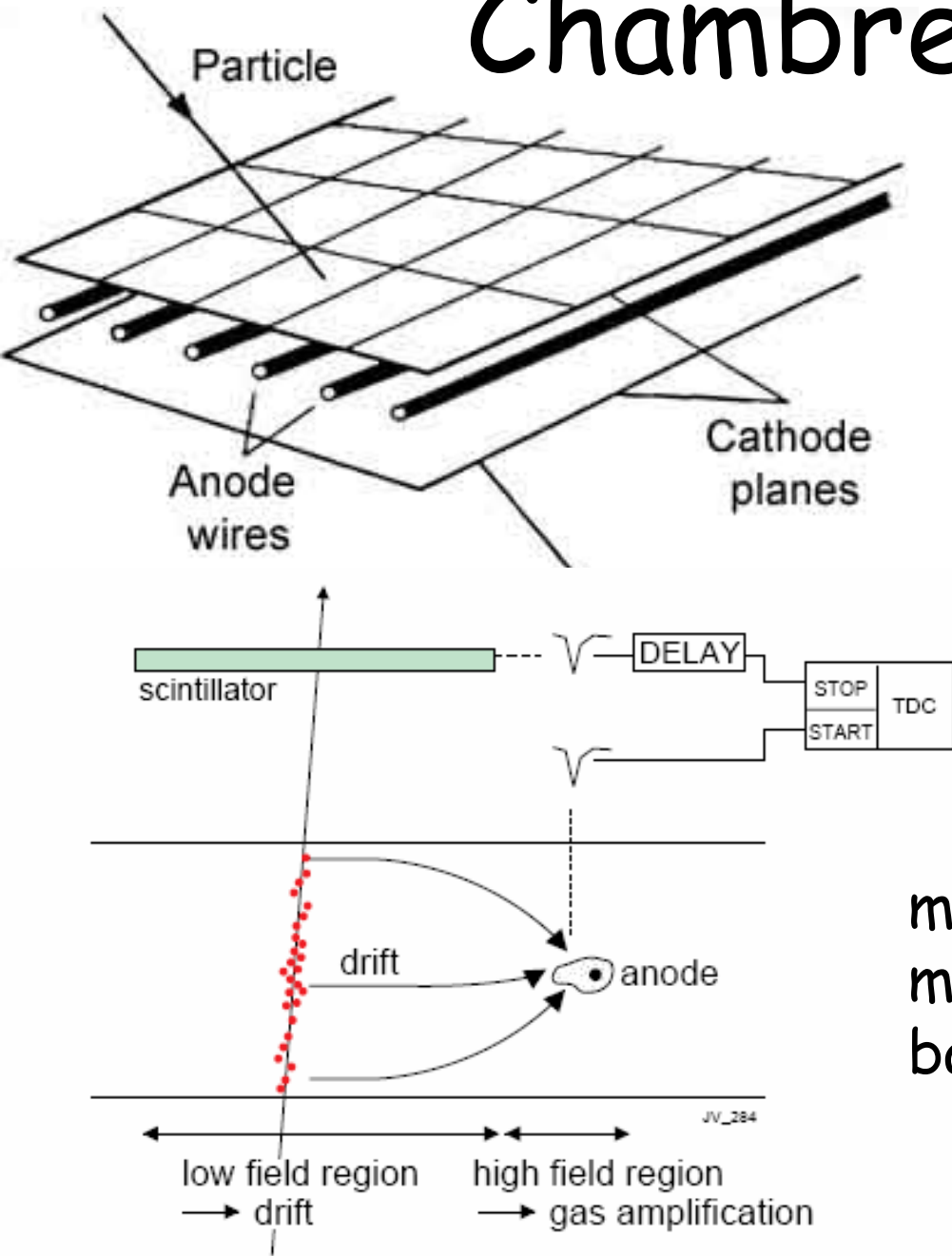


« n » points

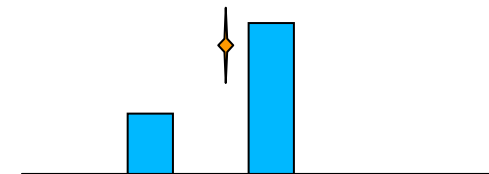


Chambre multi-fils proportionnel : MWPC

Chambre multi-fils



meilleure résolution spatiale :
méthode de reconstruction
barycentrique.

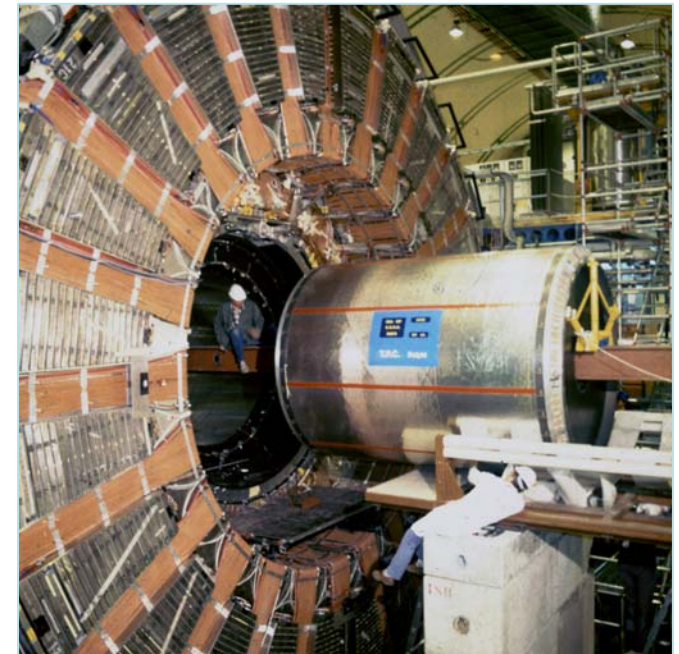
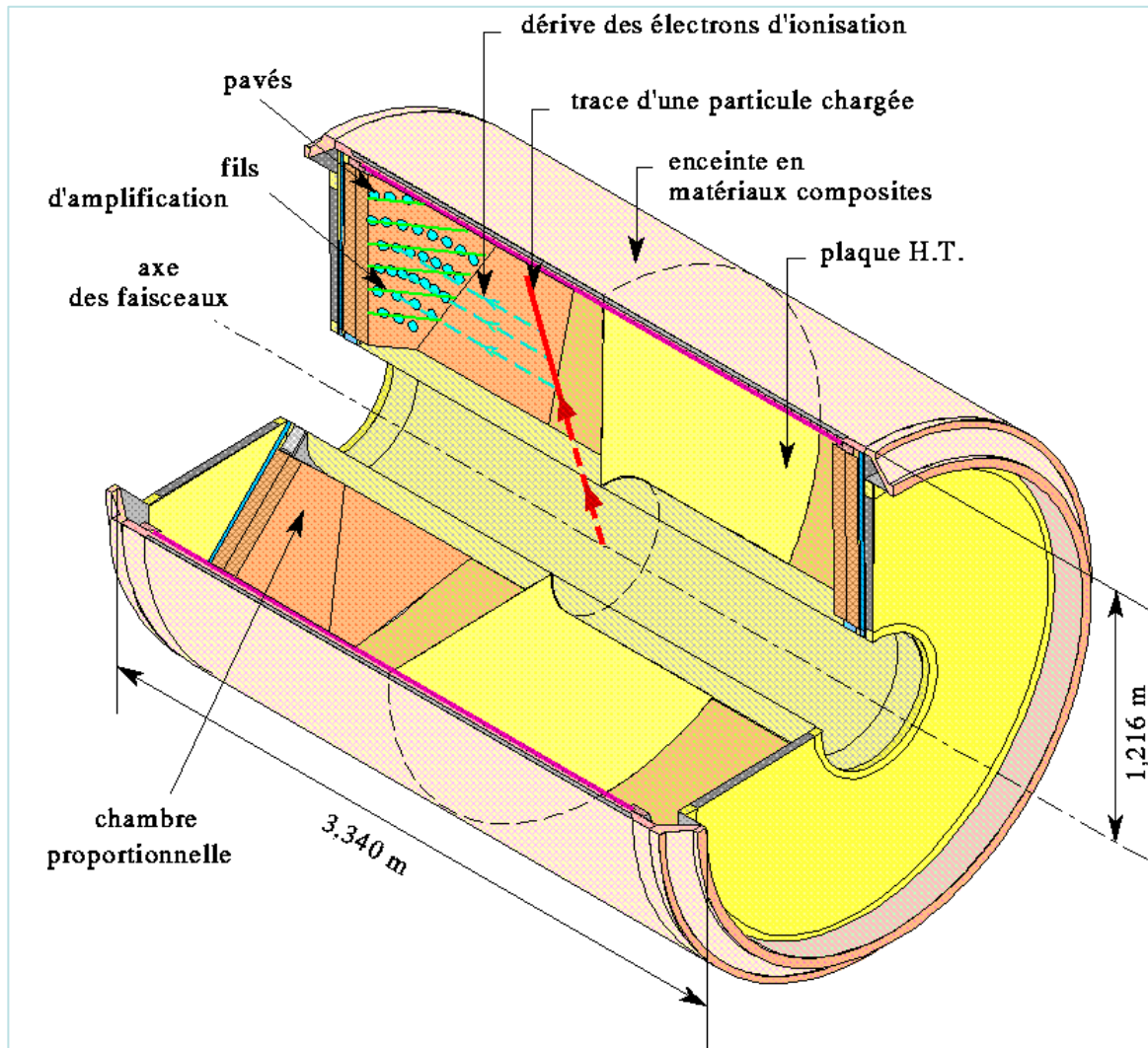


Détecteurs à gaz

Les chambres à étincelles



La chambre à projection temporelle

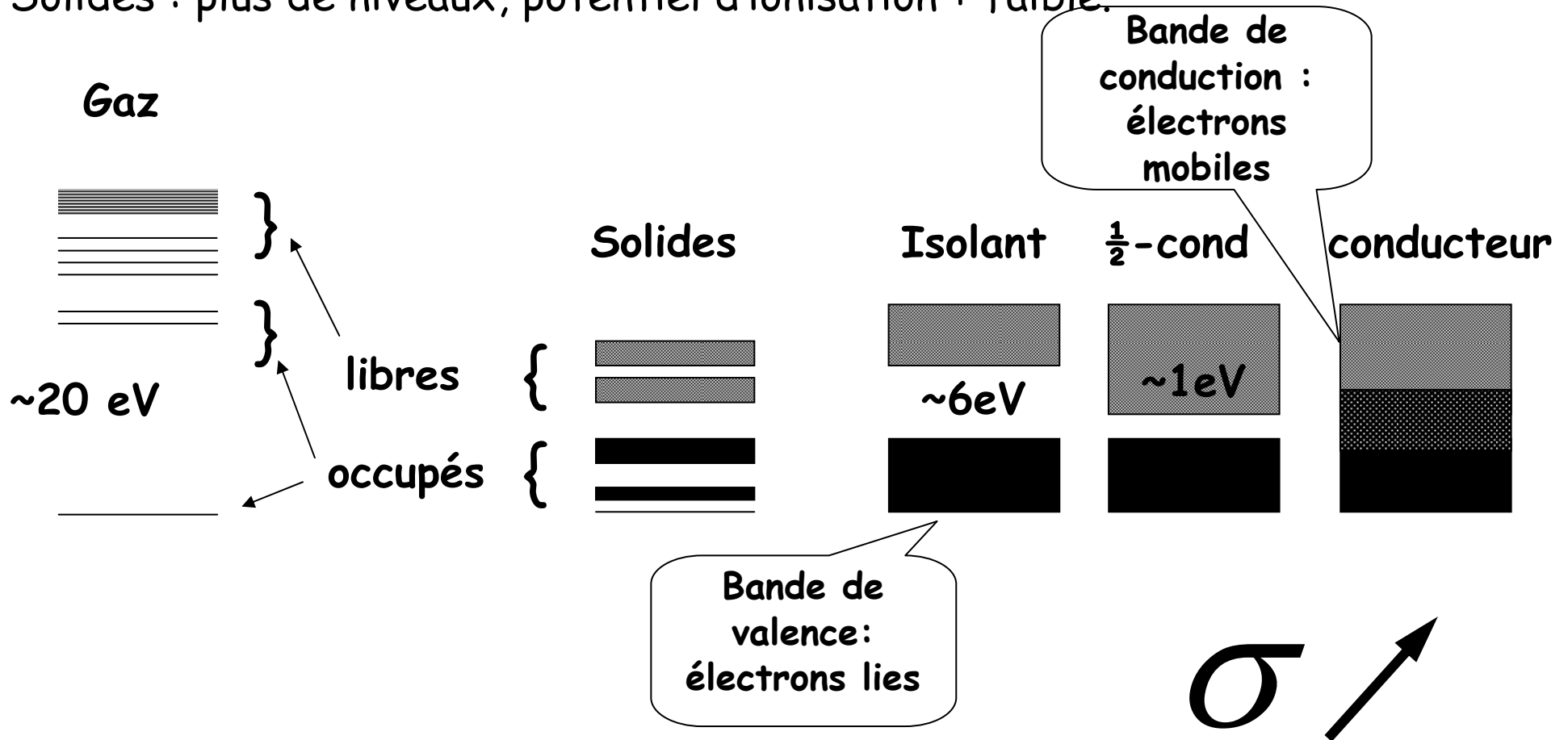


Chambre à projection temporelle de l'expérience DELPHI du CERN

Détecteurs solides

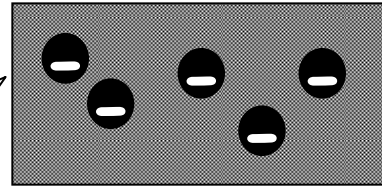
Ionisation et excitation

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

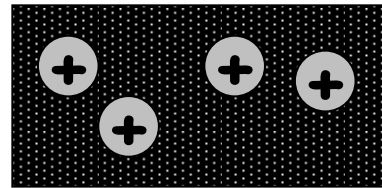


Les semi-conducteurs

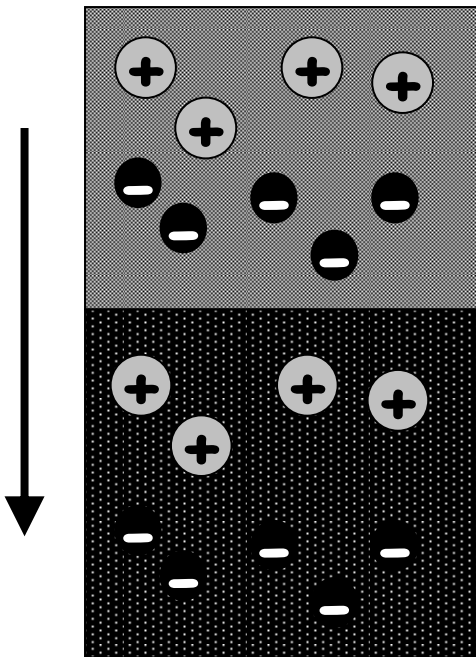
Dopage N: donneur en charges négatives



Dopage P: receveur de charges négatives

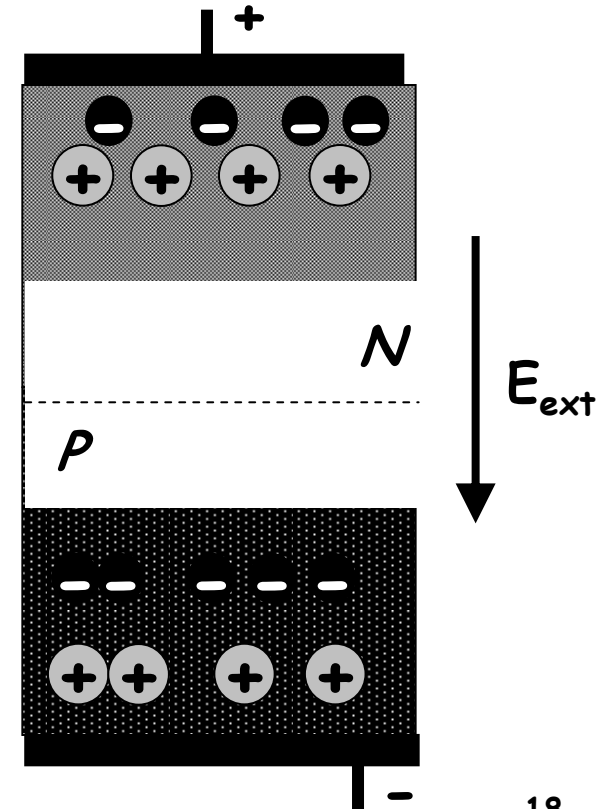
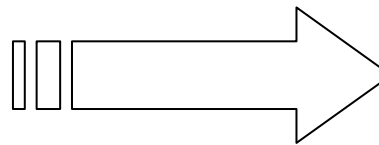


migration des charges négatives



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

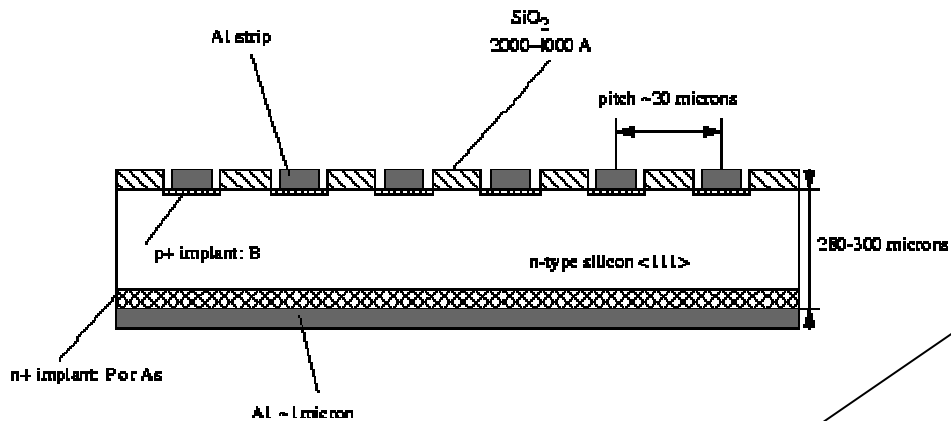
E_{int}



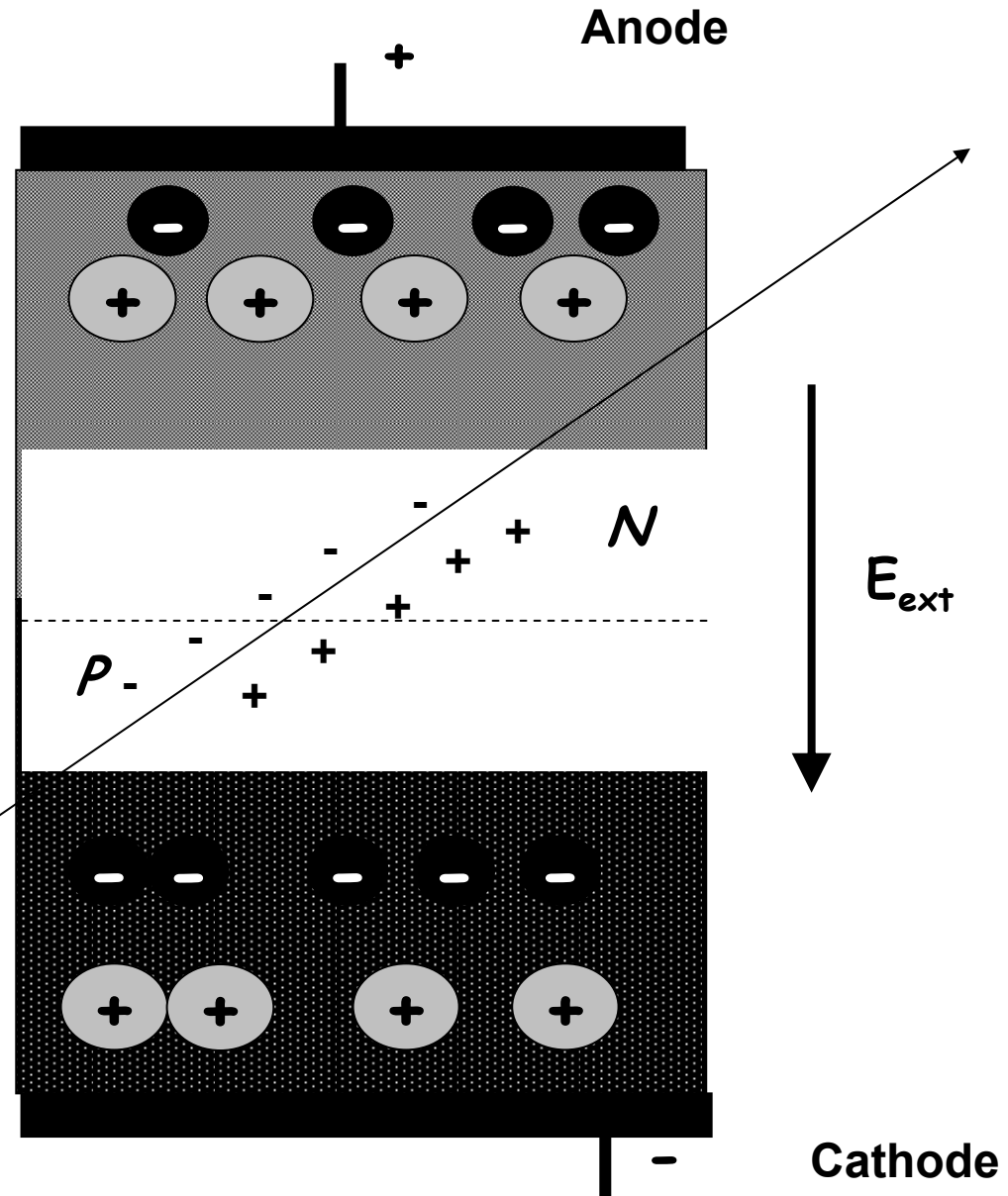
Principe d'une jonction

Une Particule chargée ionise le milieu déplété.

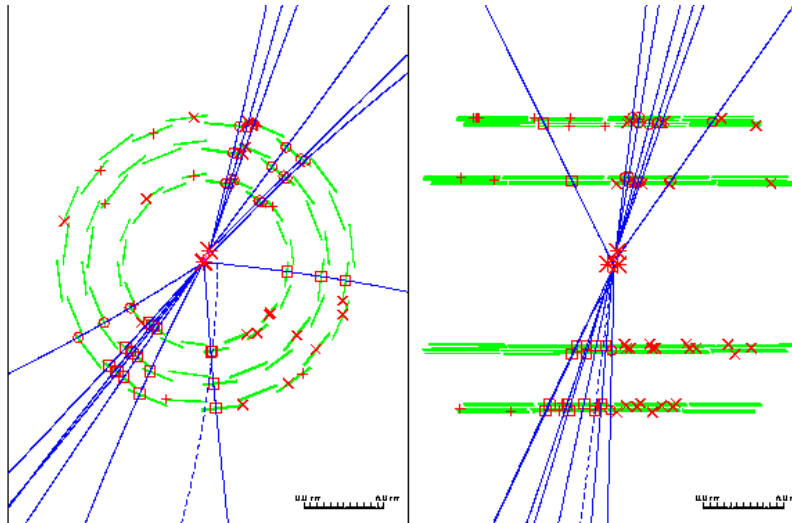
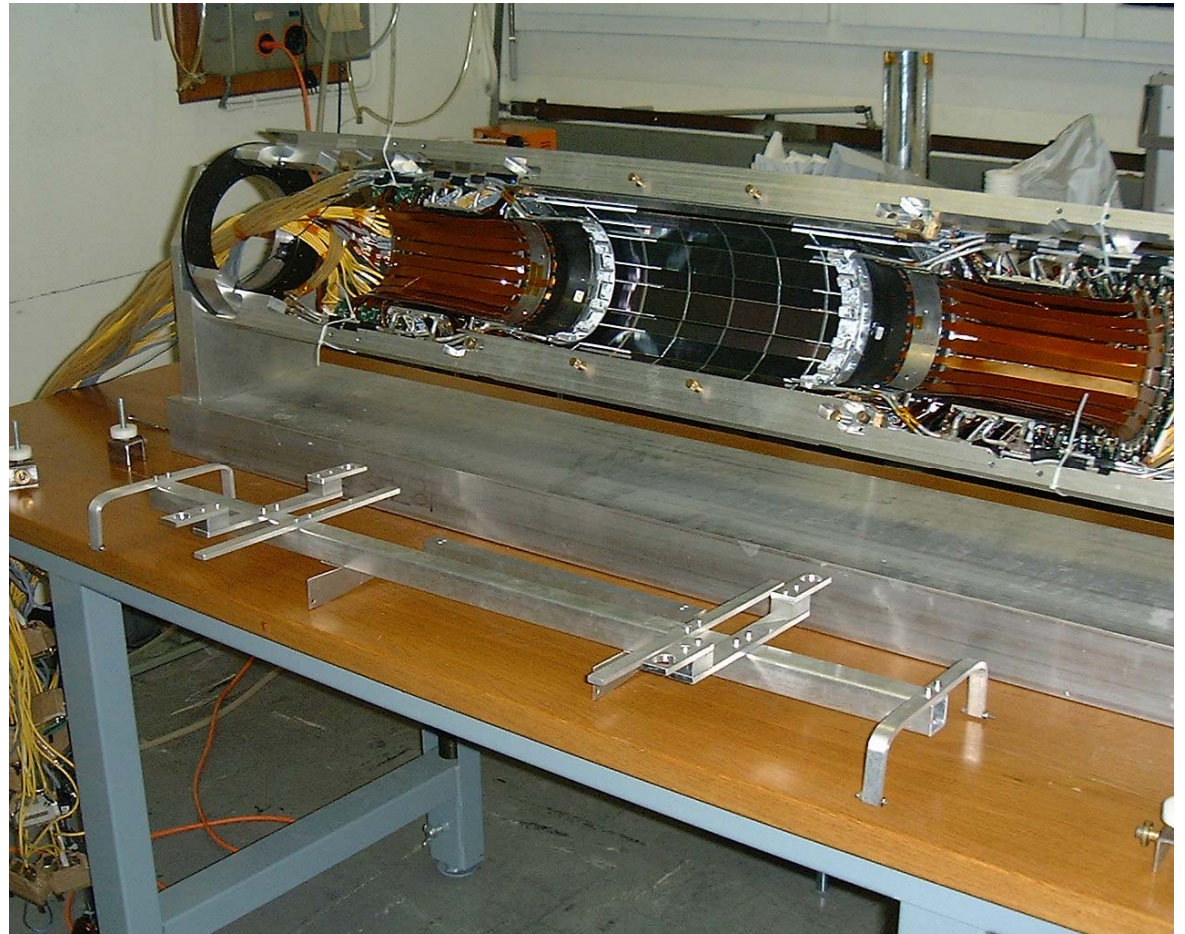
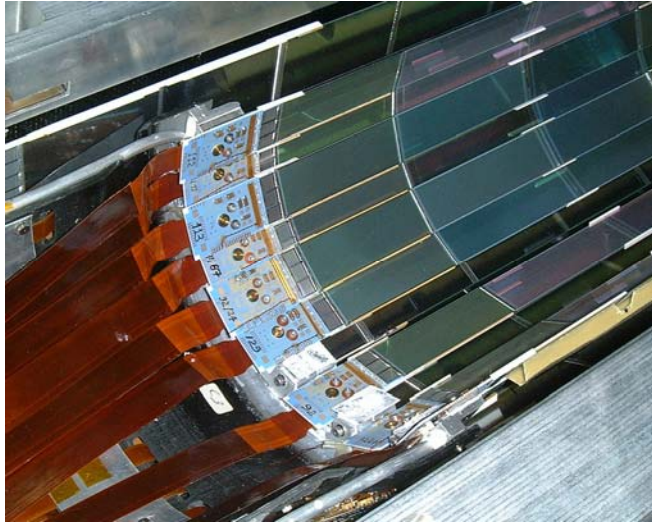
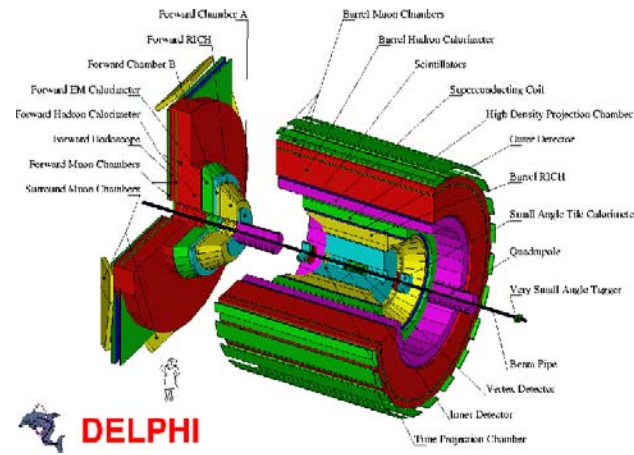
Les charges négatives sont collectées par l'anode et produisent un signal détectable.



Détecteur rapide et de bonne résolution spatiale.



Micro vertex



Détermination de la charge et de l'impulsion

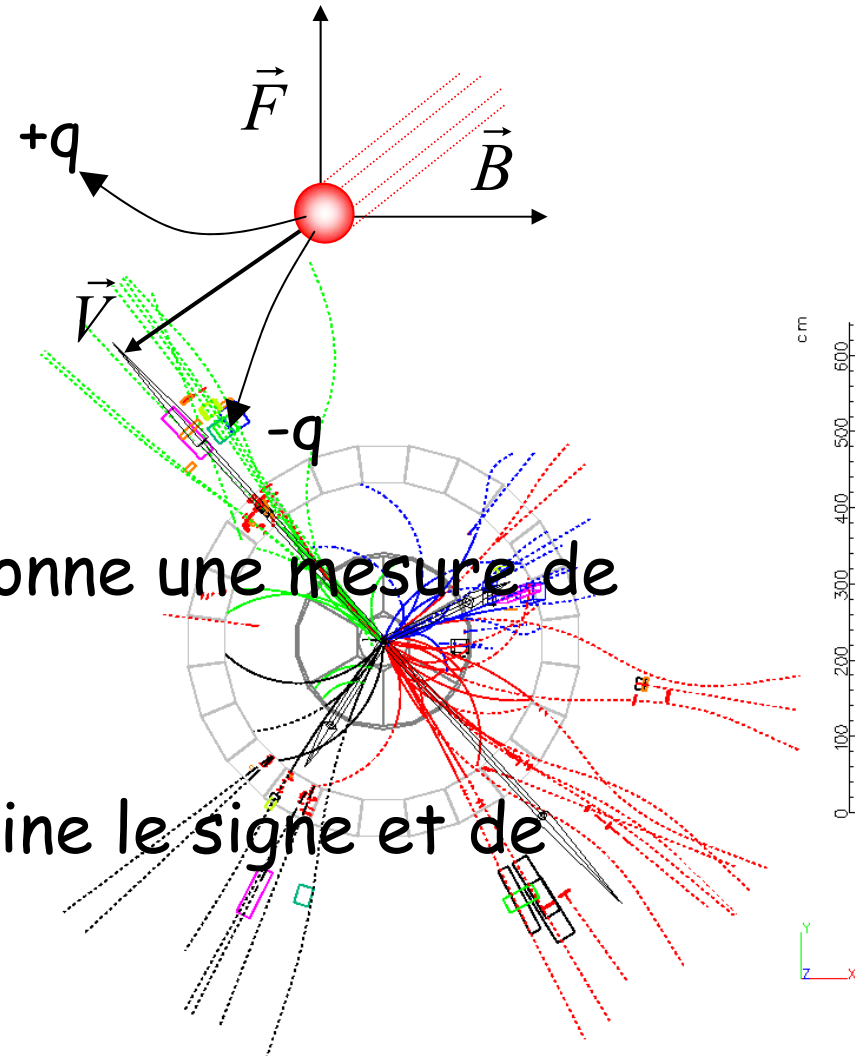
Détermination de la charge et l'impulsion

- 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

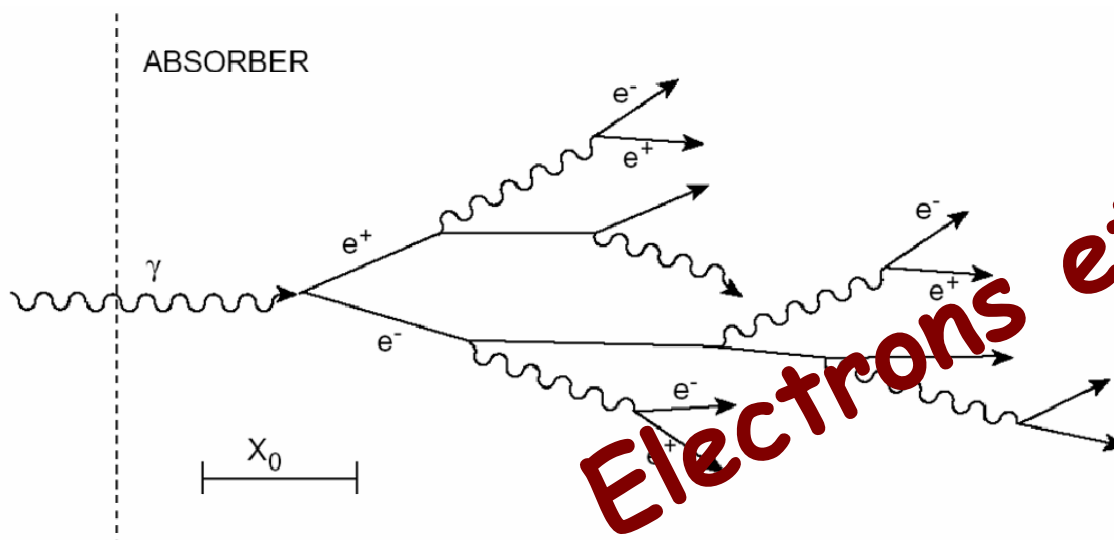


Gerbes électromagnétiques

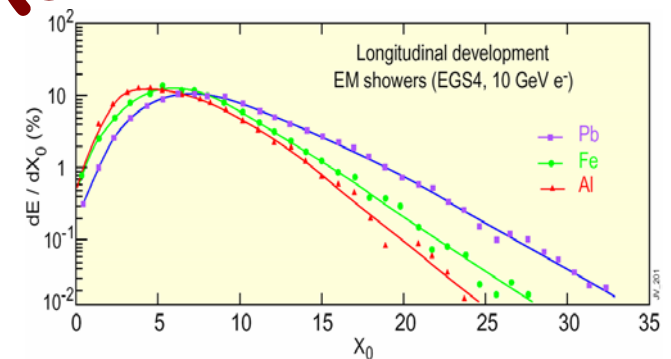
À haute énergie (GeV), les électrons perdent leurs énergies presque exclusivement par **rayonnement de freinage** et les photons perdent les leurs par **production de paire**. Le seuil correspond à l'énergie critique définie par :

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

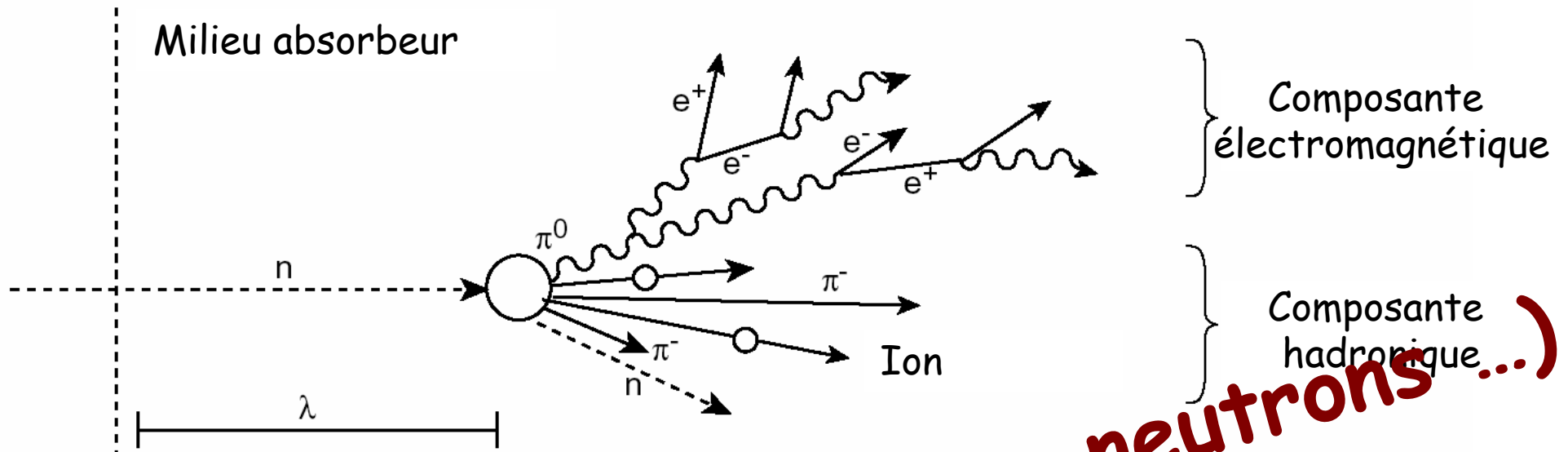
La combinaison de ces deux effets résulte en la formation d'une **gerbe électromagnétique** quand un électron ou un photon entre dans un milieu dense.



Electrons et photons

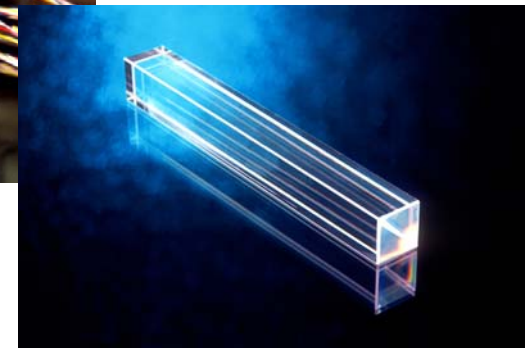
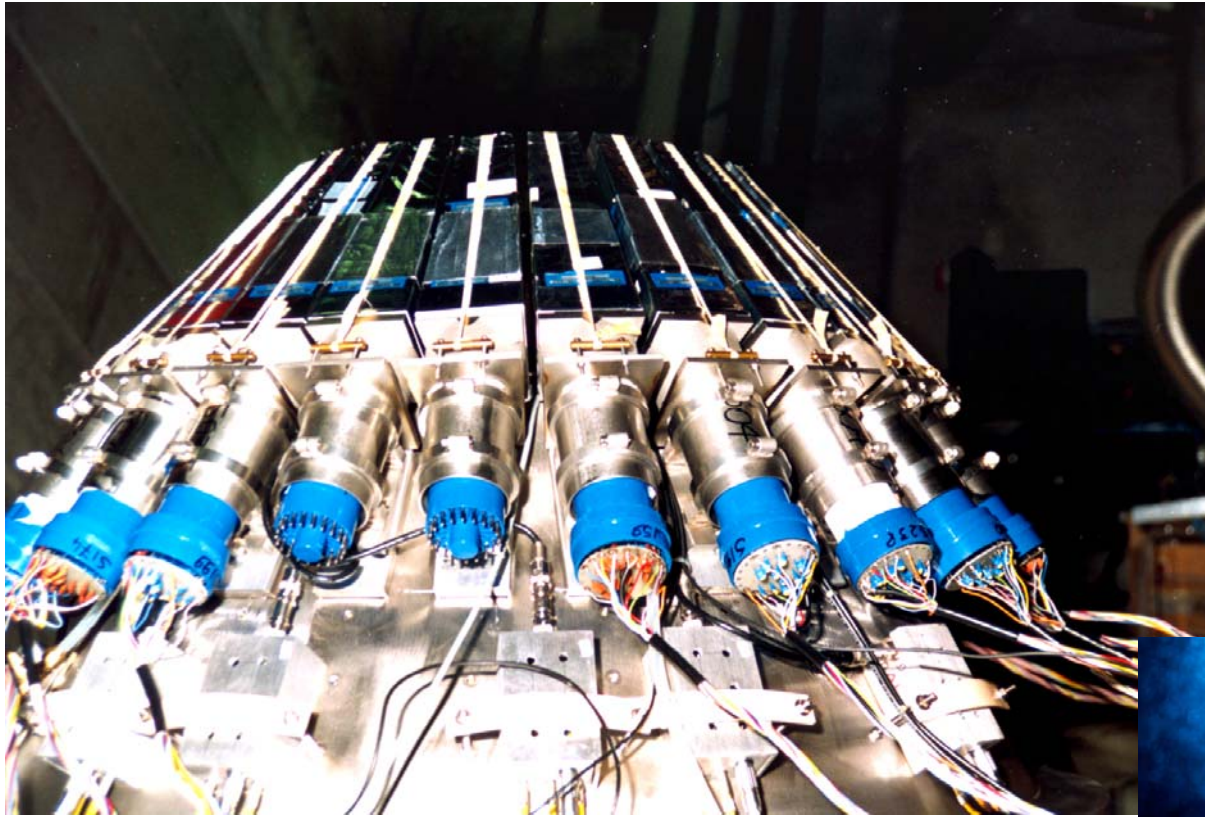


Gerbes hadroniques

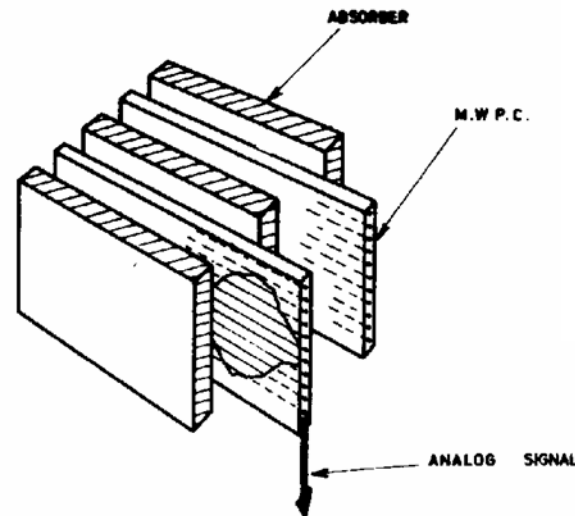
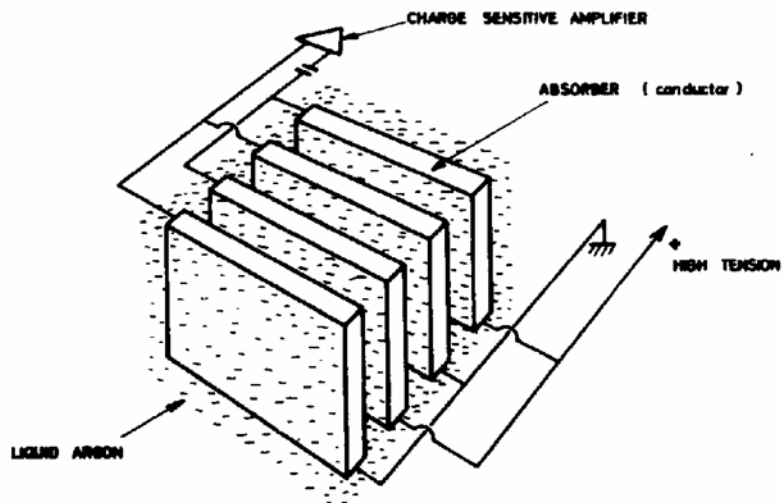
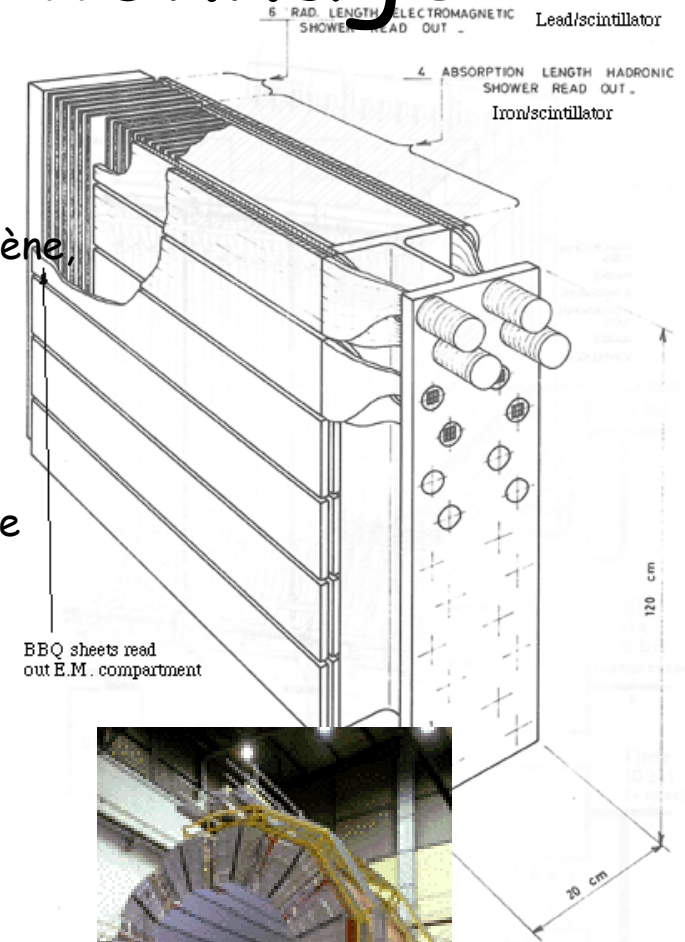
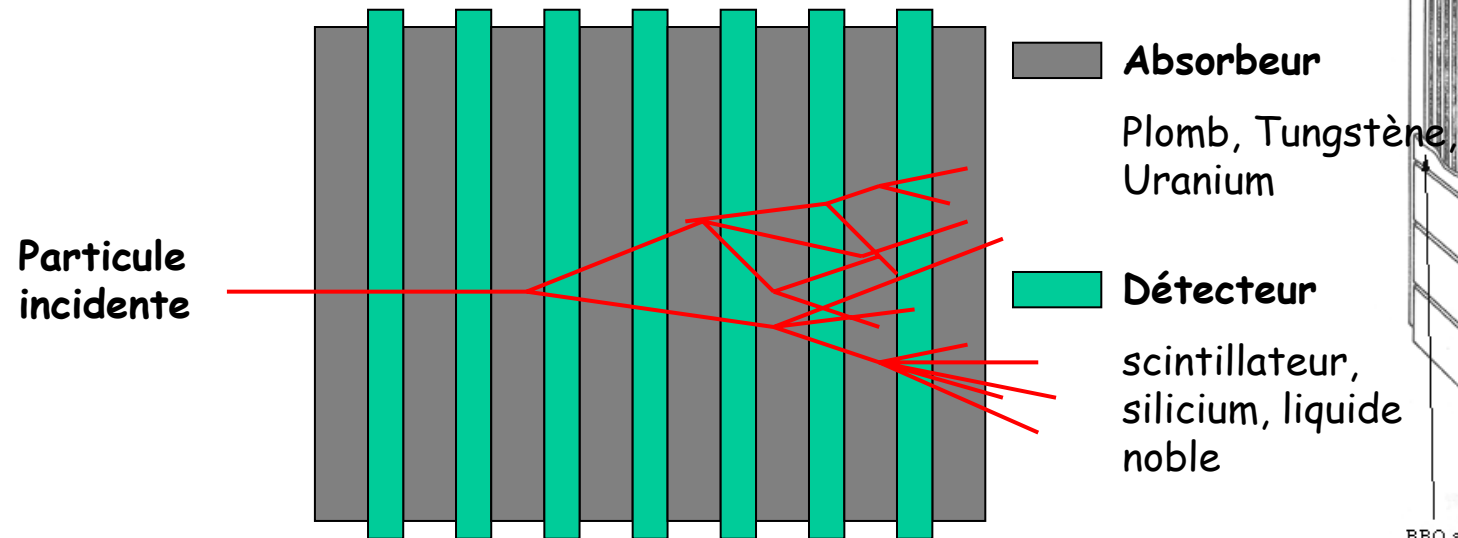


Hadrons (protons, ions, neutrons...)

Détecteurs homogènes



Détecteurs à échantillonnage

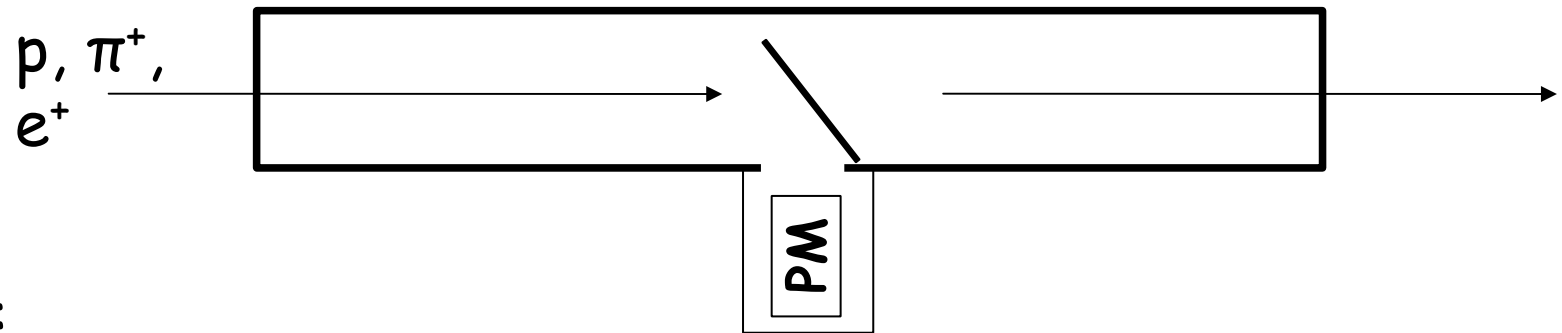


Identification des particules

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 :

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

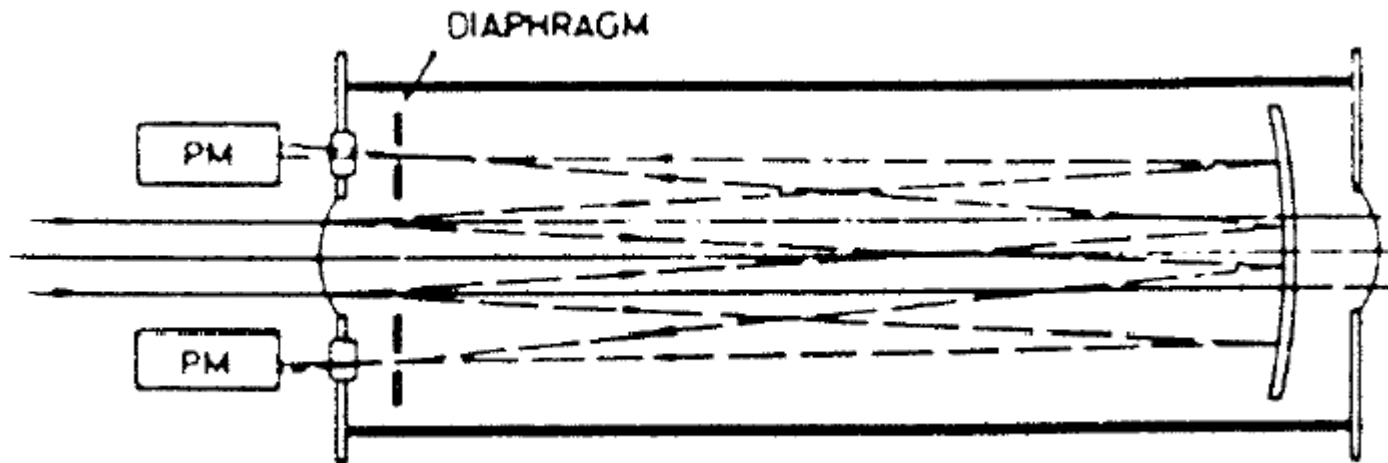


exemples :

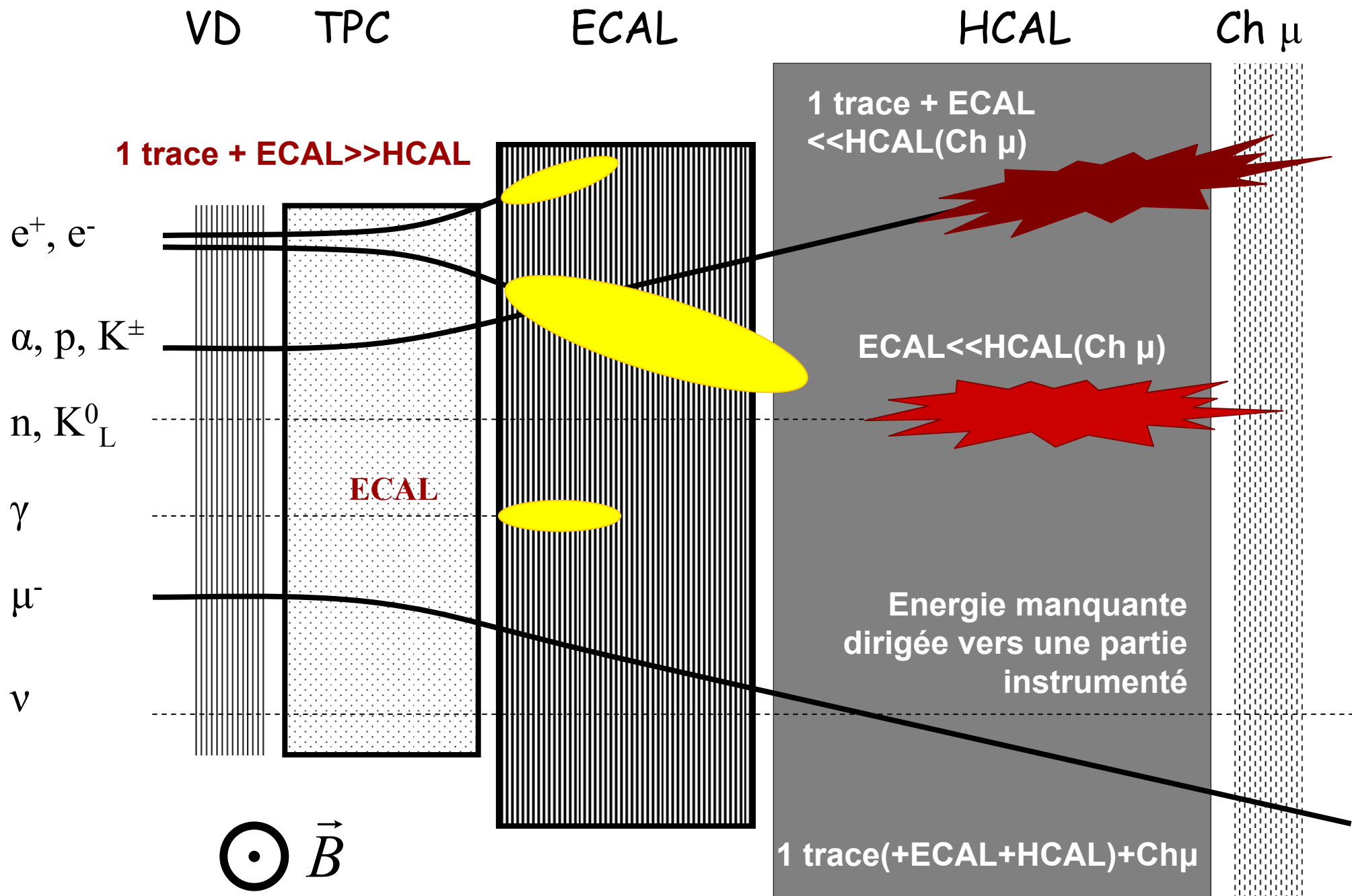
milieu	indice	ρ	p(938)	$\pi(139)$	e(0.511)
eau	1.33	1.52	1.4 GeV	211 MeV	776 keV
hélium	$1+4.3 \cdot 10^{-5}$	0.123	115 GeV	17. GeV	62.8 MeV

Compteur Cherenkov différentiel

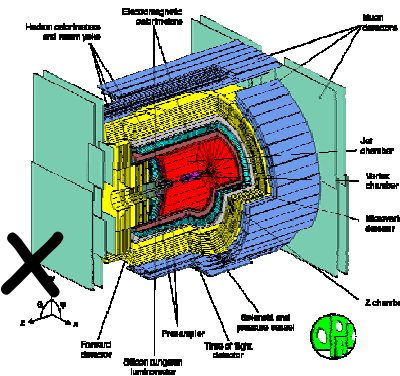
L'utilisation d'un miroir permet de sélectionner un intervalle en β (ce qui correspond, pour une impulsion donnée à un intervalle de masse).



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



Reconstruction de vertex

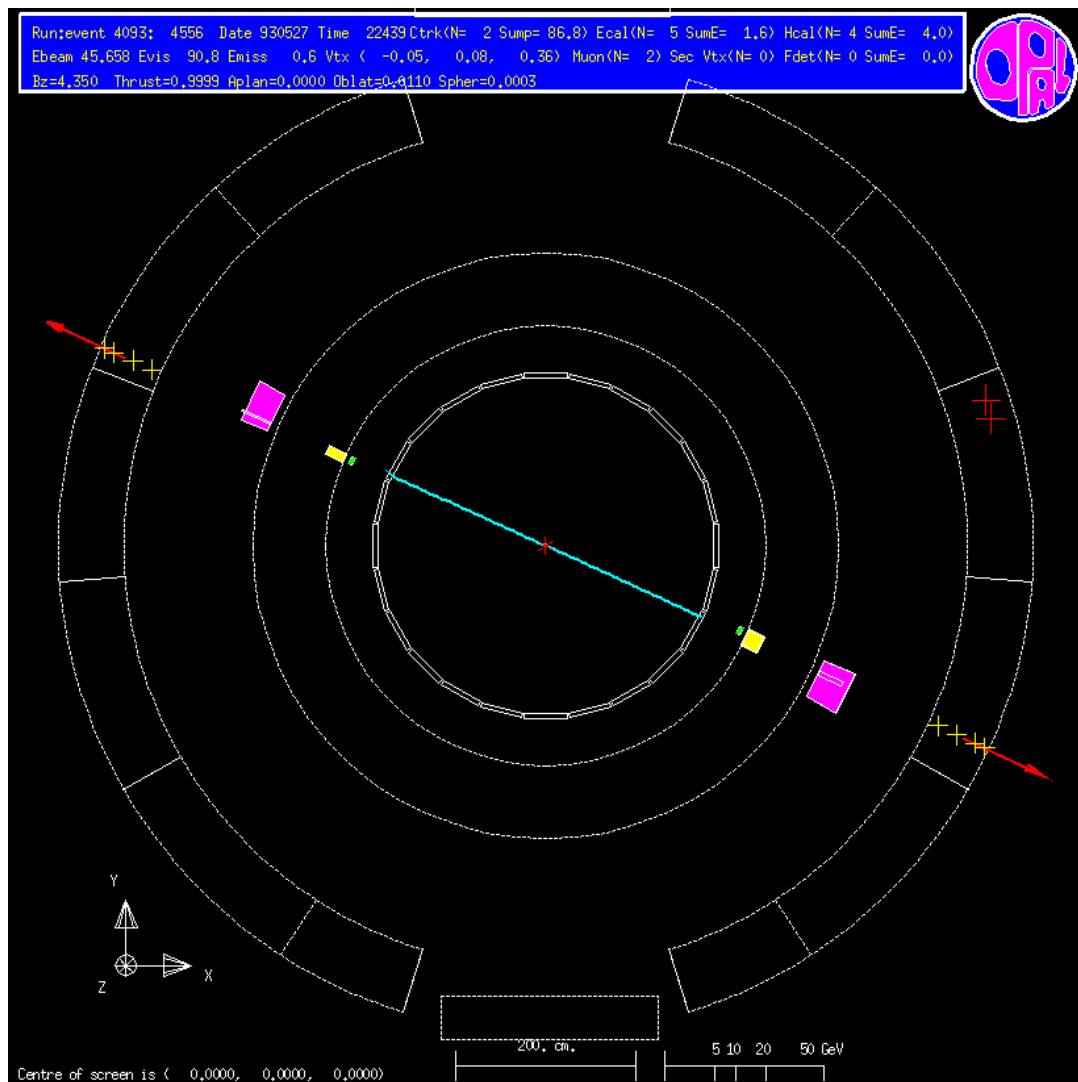
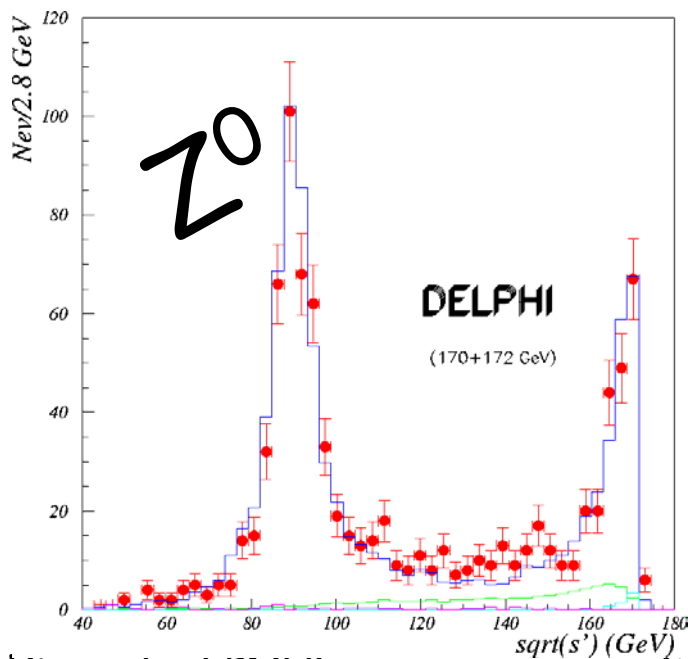


- $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

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

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

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



Détecteur 4π

