

# Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse

Pascal Vincent  
Université Pierre et Marie Curie

Introduction  
Les systèmes expérimentaux  
Les interactions des particules chargées  
Les interactions des particules neutres  
**Les détecteurs de particules**  
Visite d'une expérience

# 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 a décharges
- Les émulsions nucléaires
- Les semi-conducteurs

## **Energie et impulsion :**

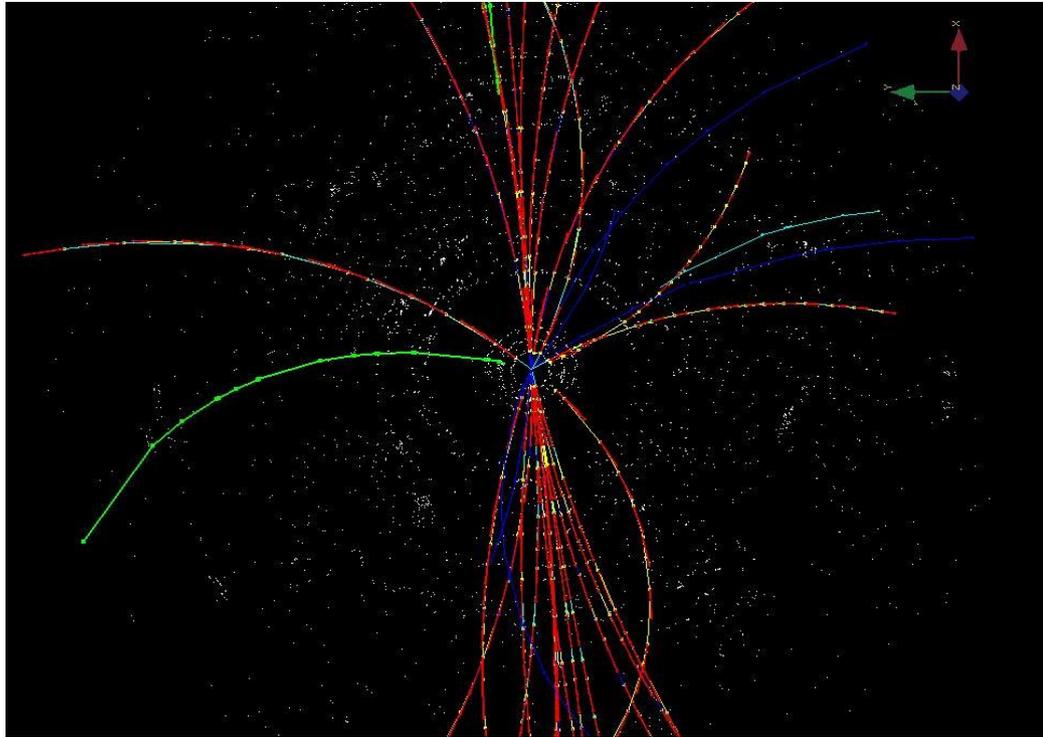
- Les scintillateurs
- photomultiplicateurs
- Les semi-conducteurs
- bolomètres
- Détecteurs Cherenkov
- Calorimètres et spectromètres  
(champs magnétiques)

## **Identification :**

- Imageurs Cherenkov
- Les chambres d'ionisation
- Systèmes

## **Comptage :**

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



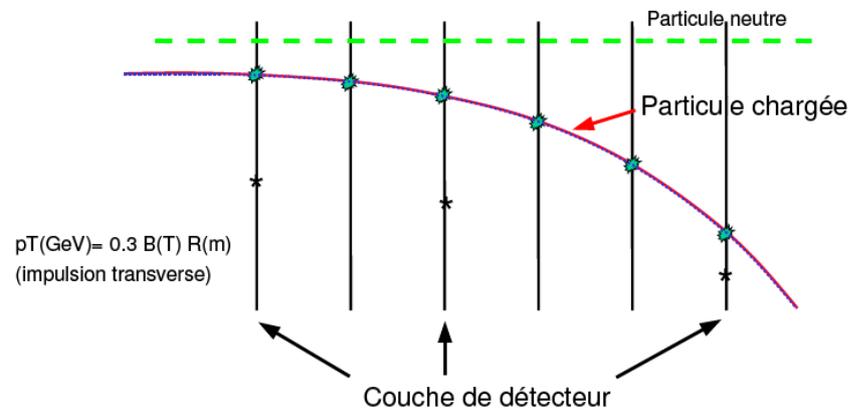
Détecteurs de grandes tailles

# MESURE DE LA POSITION

# Principe

Il faut perdre peut d'énergie tout en laissant un signal détectable

=> il faut un gaz



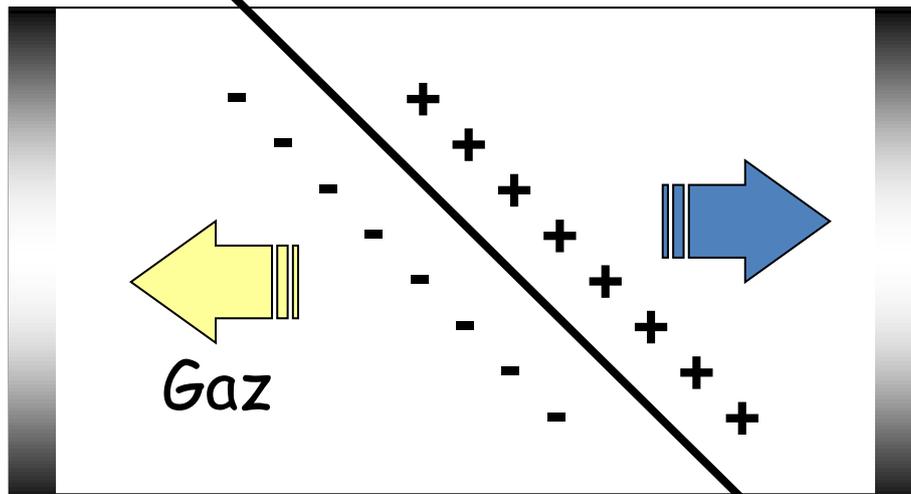
# Chambre d'ionisation

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 :



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

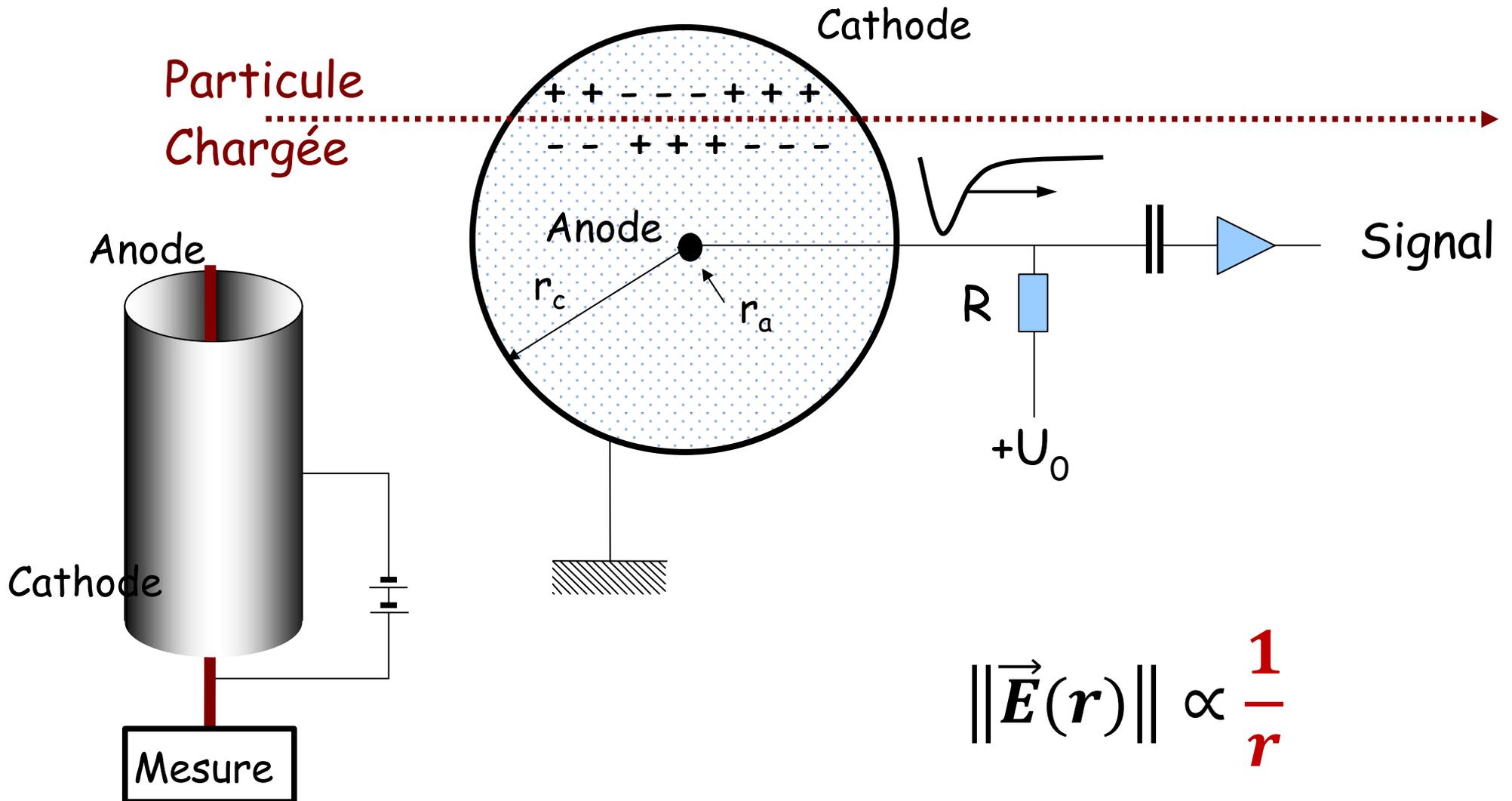
Gaz	W (eV)
Air	35,0
Argon	26,6
BF <sub>3</sub>	33,8

Anode

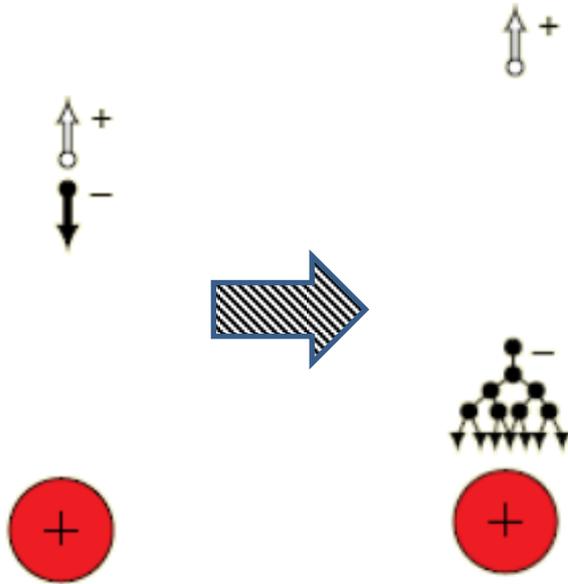
$$\|\vec{E}(r)\| = \overrightarrow{cst}$$

Cathode

# Mesure de la position dans une chambre proportionnelle



# Mesure de la position dans une chambre proportionnelle



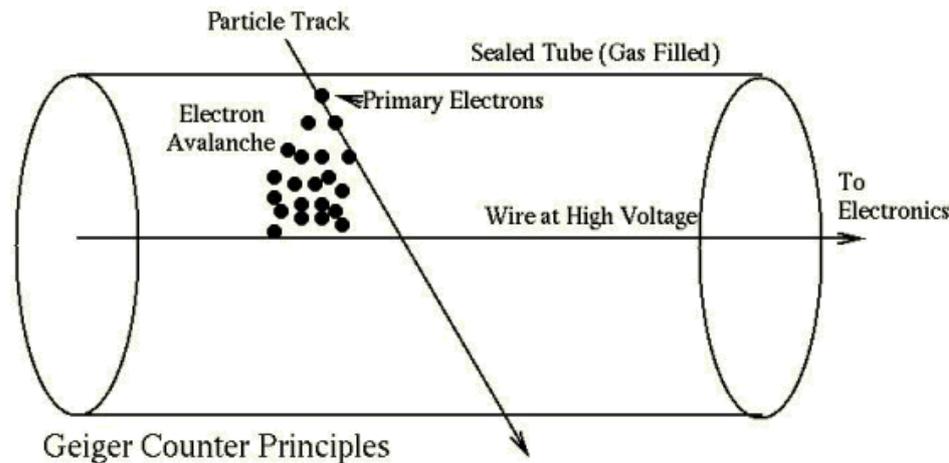
$$Q = -e \cdot n_0 \cdot A \propto E$$

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

$$A \propto e^{f(V)}$$

# Mode d'avalanche

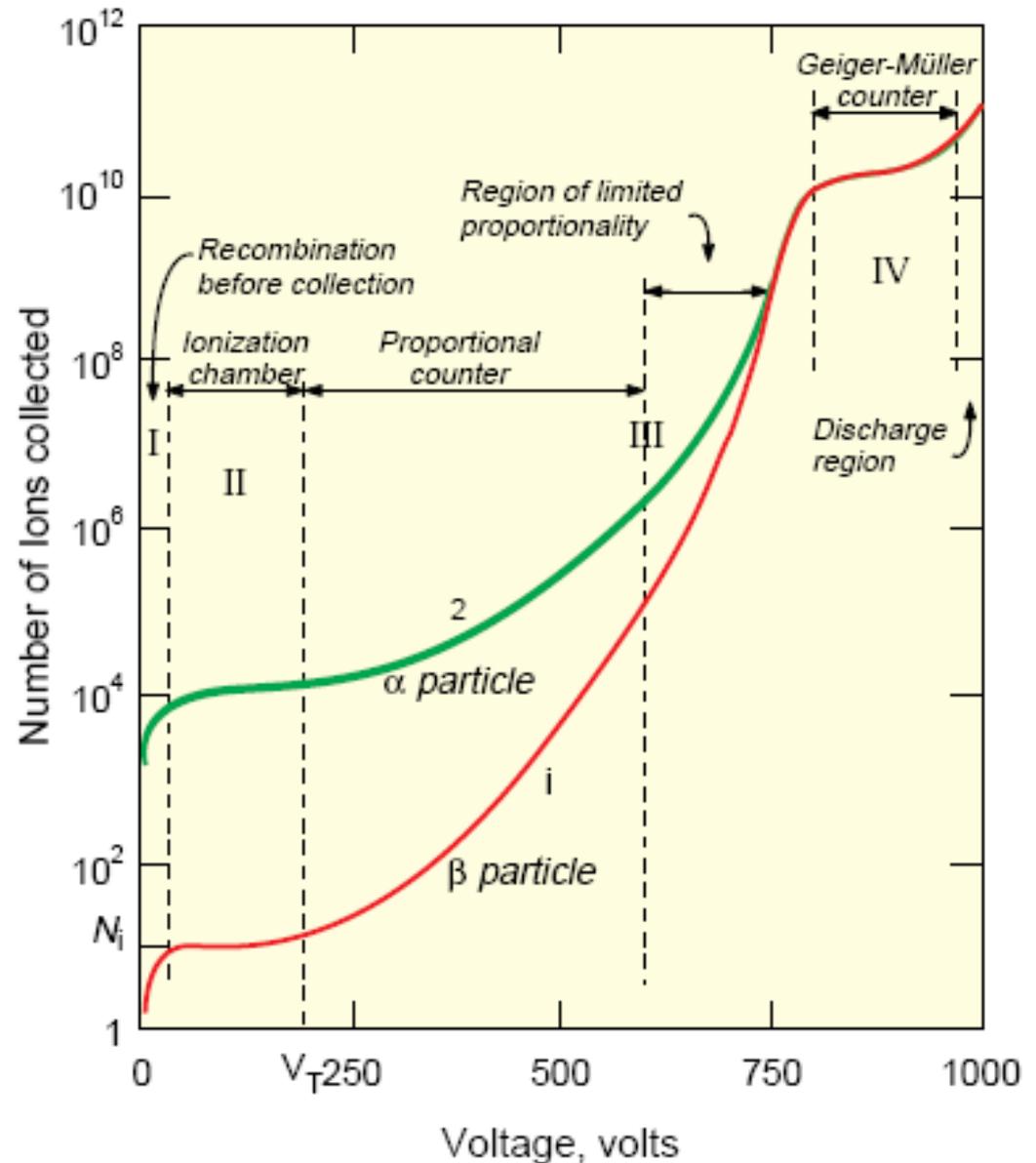
Lorsque la tension augmente l'avalanche se développe dans tout le volume de la chambre : **mode Geiger-Muller**



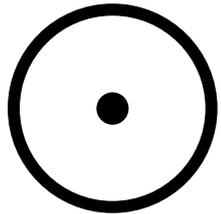
La charge collectée ne dépend plus de l'énergie de la particule incidente. Le mode Geiger-Muller permet un comptage des particules.

# Détecteurs à gaz

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

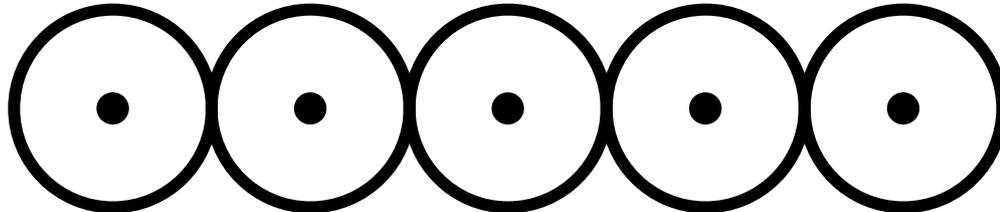


# Evolution des chambres

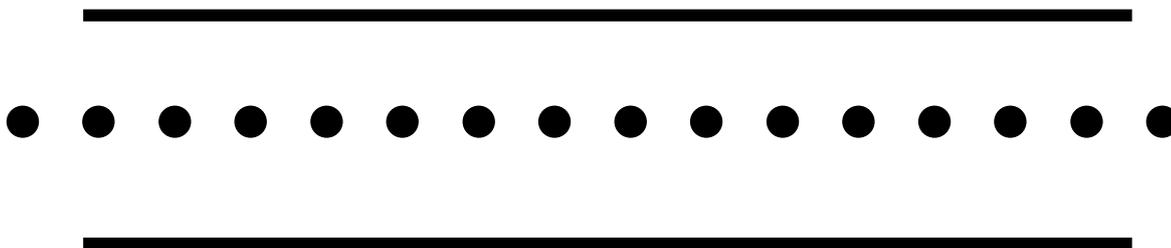


Compteur  
proportionnel

1 points dans l'espace

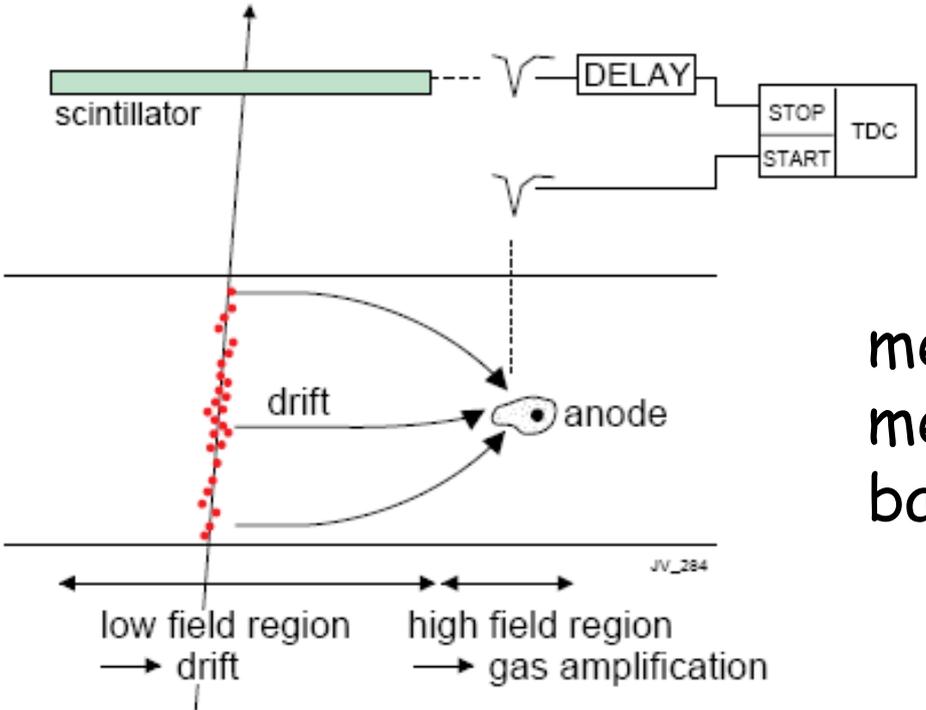
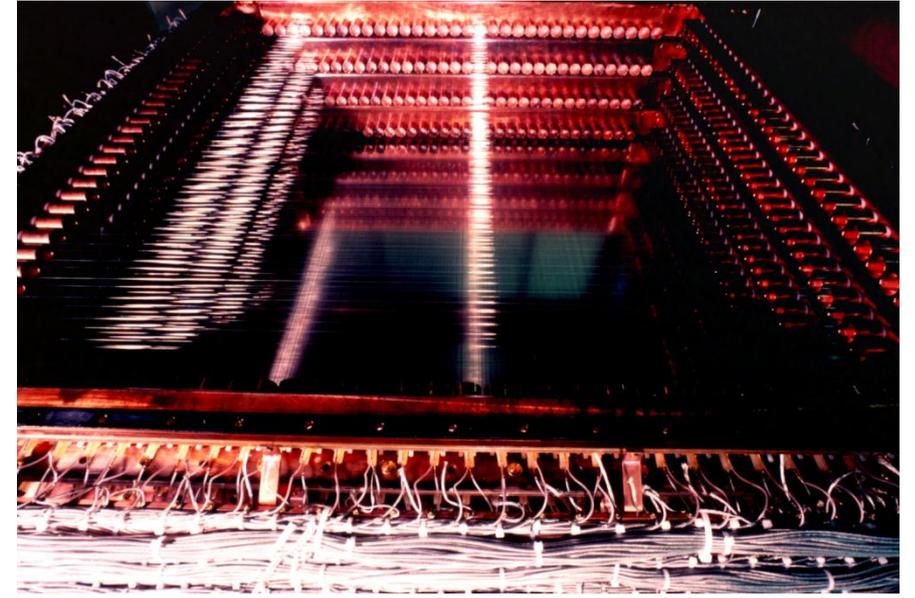
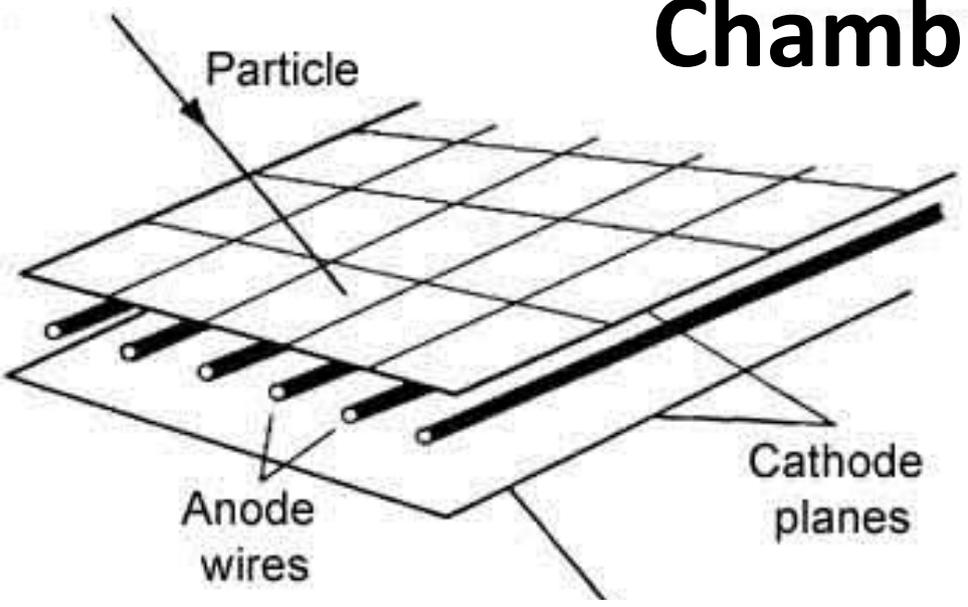


« n » points

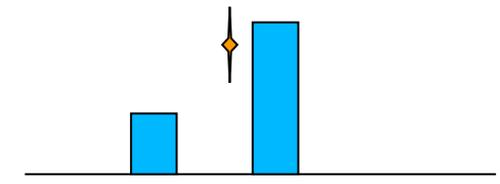


Chambre multi-fils proportionnel : MWPC

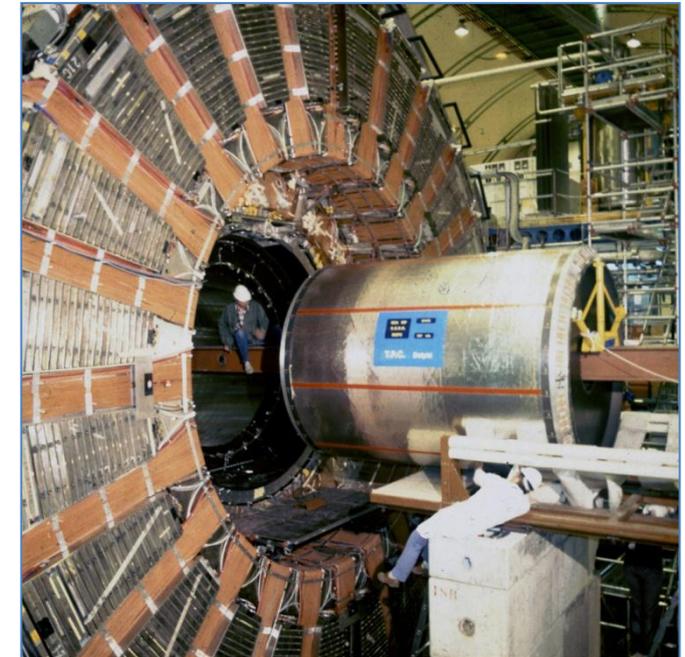
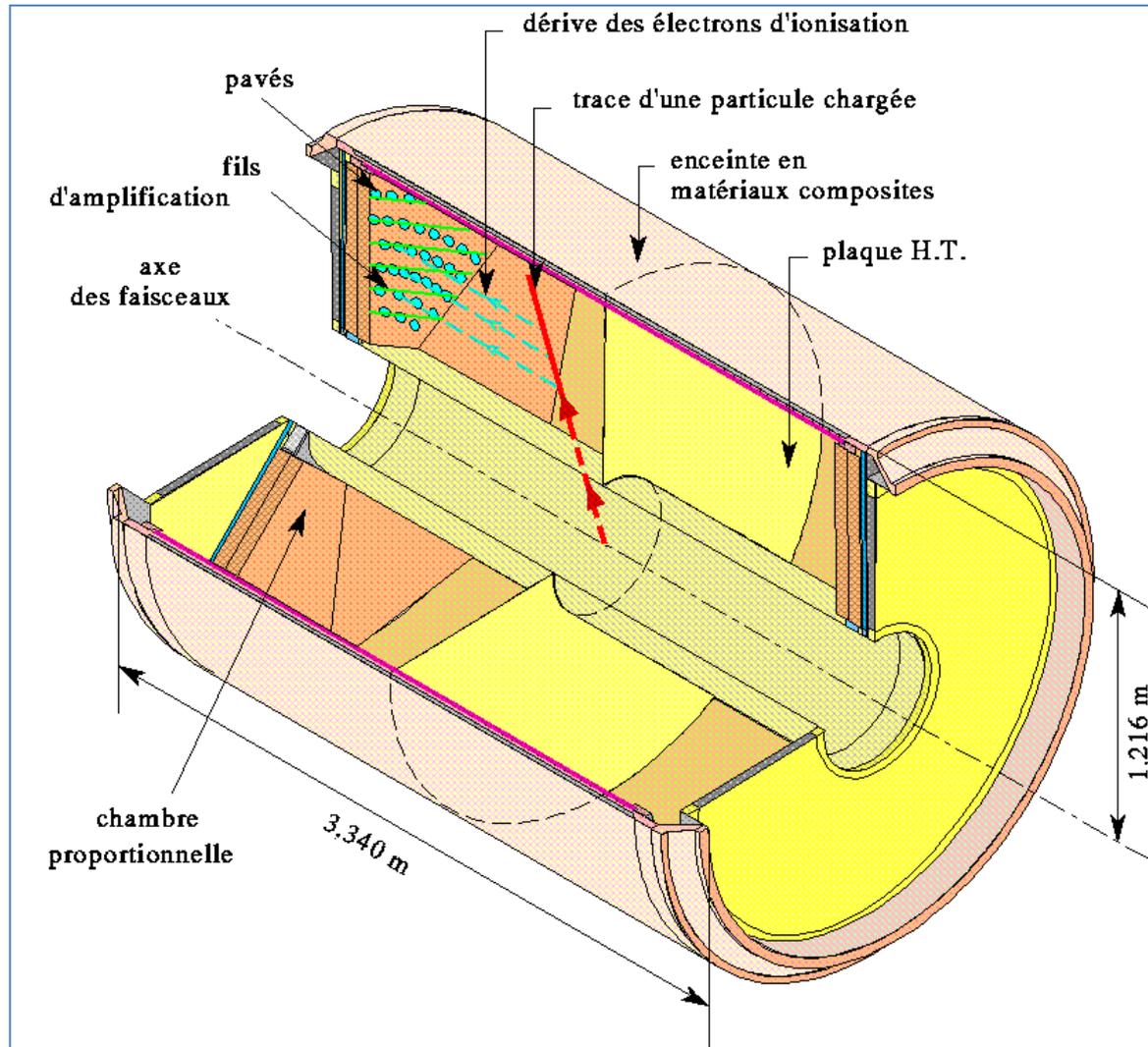
# Chambre multi-fils



meilleure résolution spatiale :  
méthode de reconstruction  
barycentrique.



# La chambre à projection temporelle



Chambre à projection temporelle de l'expérience DELPHI du CERN

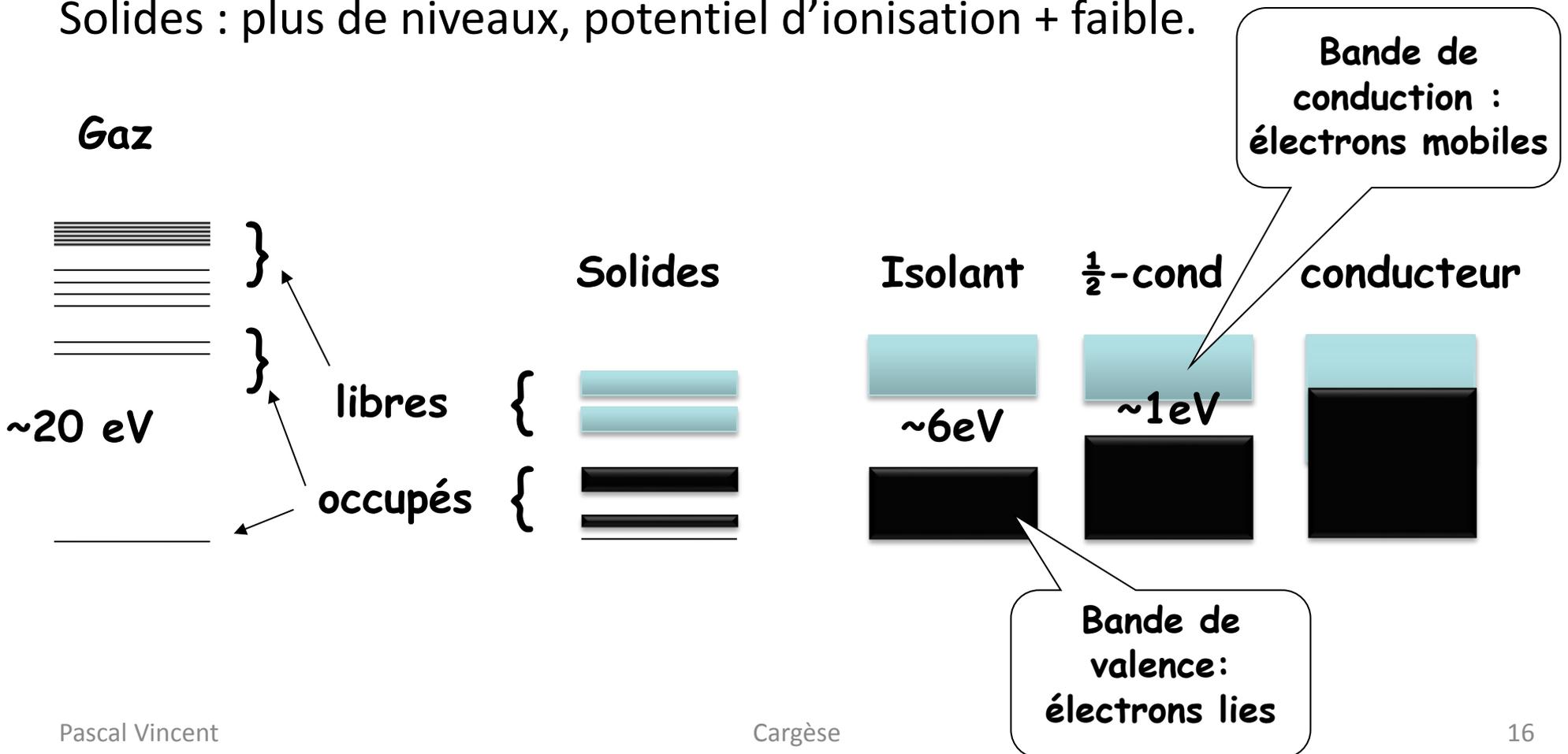
Pour une plus grande efficacité

# DÉTECTEURS SOLIDES

# Des gaz aux solides

Gaz rares : ionisation assurée mais potentiel important faible densité.

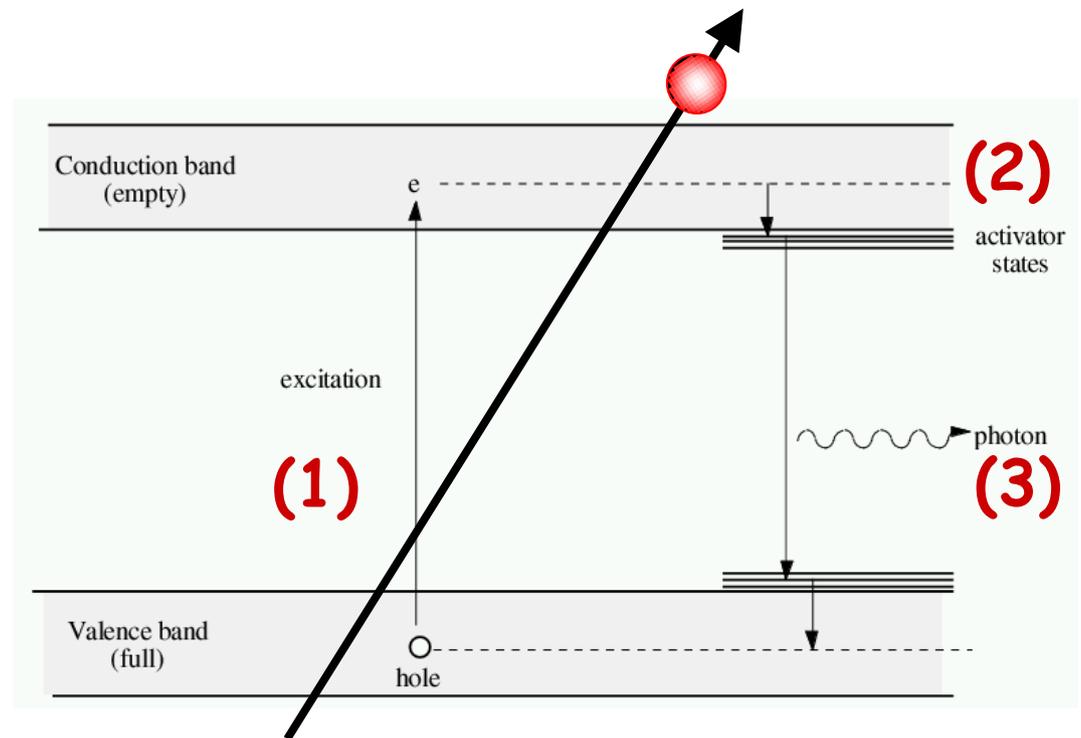
Solides : plus de niveaux, potentiel d'ionisation + faible.



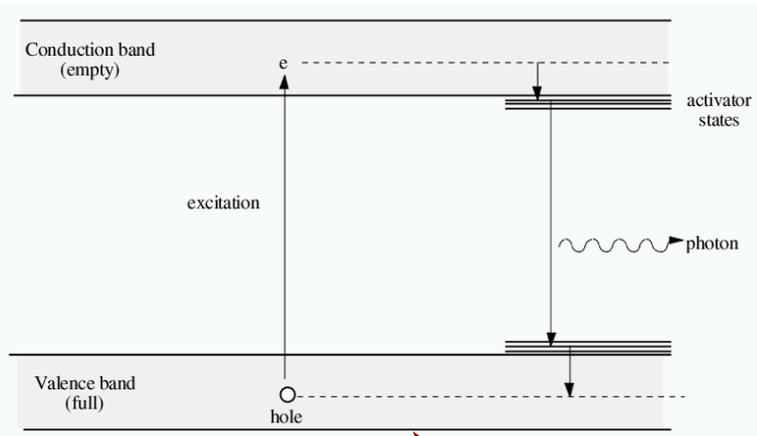
# Les isolants

L'énergie est transférée au milieu pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction (1).

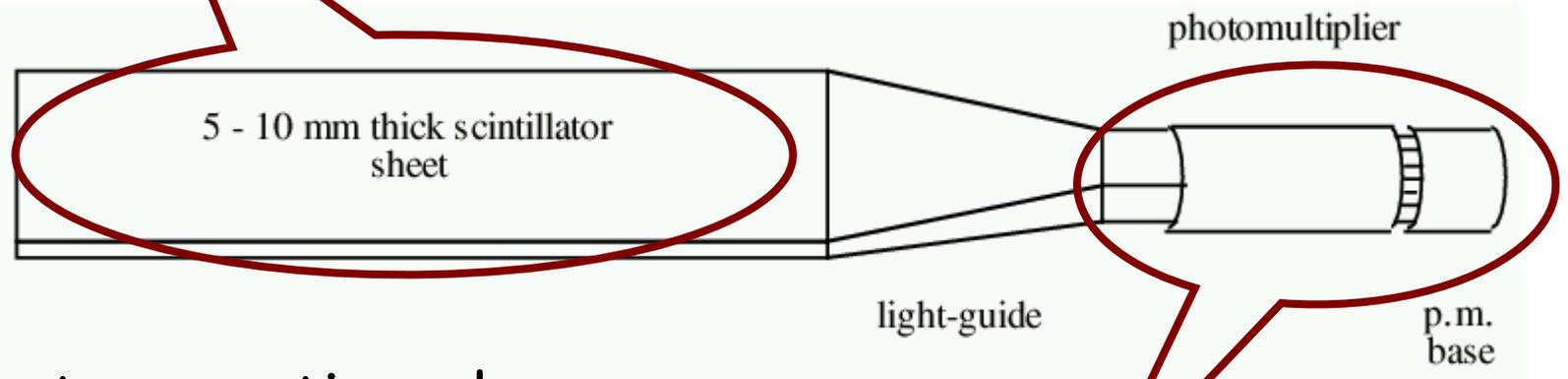
La transition inverse entraîne l'émission d'un photon d'énergie équivalente à celle qui a été déposée : milieu opaque (pièges à photons).



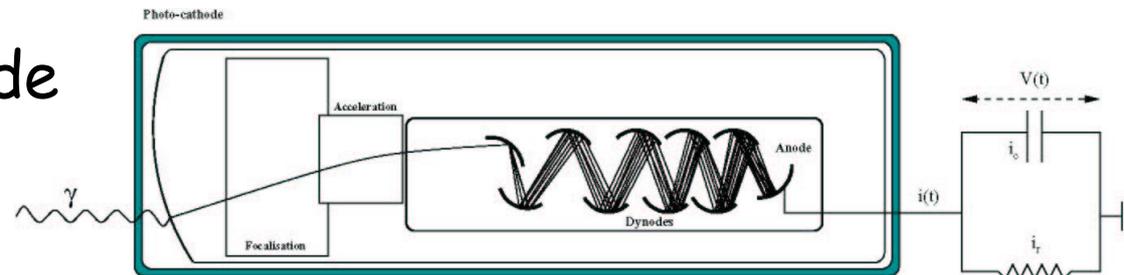
L'introduction d'impuretés (dopage) change les valeurs des transitions possibles (2) et permet de rendre le milieu transparent à ces photons (3) : Scintillation.

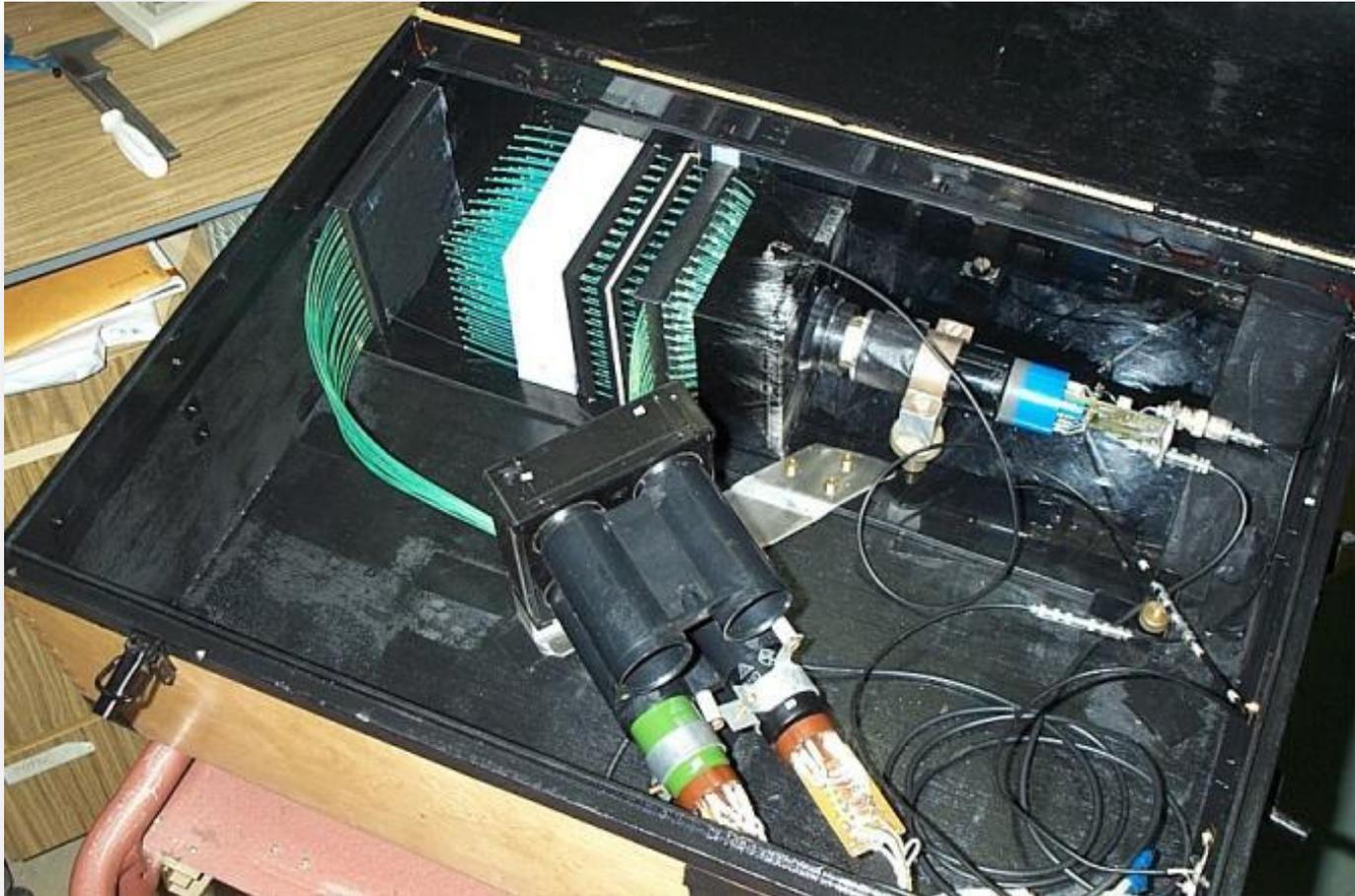


Les photons de scintillations peuvent est amènes a une photomultiplicateur par un guide de lumière.



Le photon est converti sur la photocathode (effet photo-électrique). Accélère en direction de la première dynode → avalanche





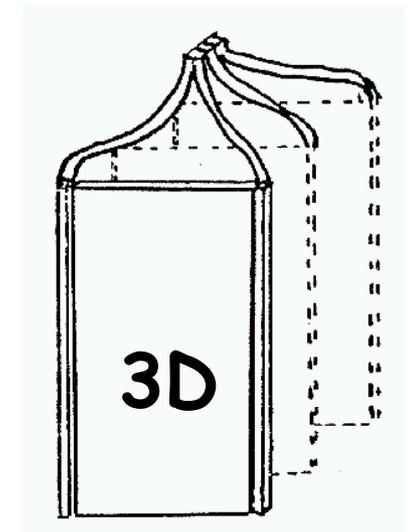
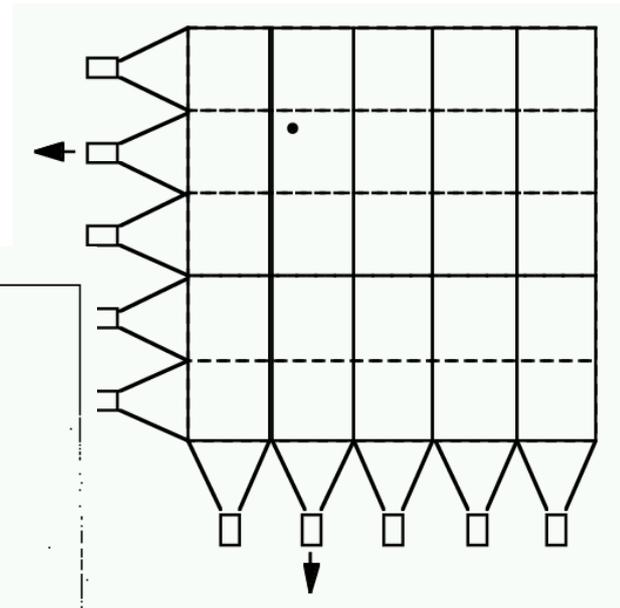
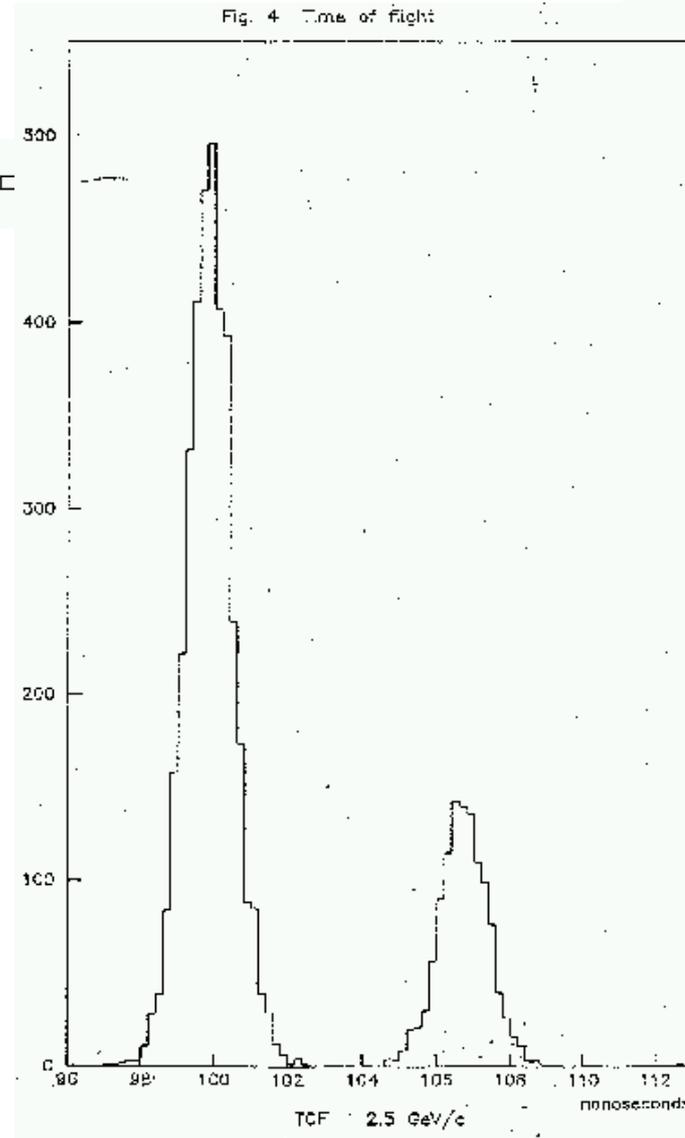
# Mesure de la position du lieu de passage de la trace



2 PM + 1 Scintillateur.

Différence de temps  
d'arrive des signaux →

Très mauvaise  
résolution spatiale mais  
bonne résolution  
temporelle ( $\sim 0.5$  ns) →  
Trigger.

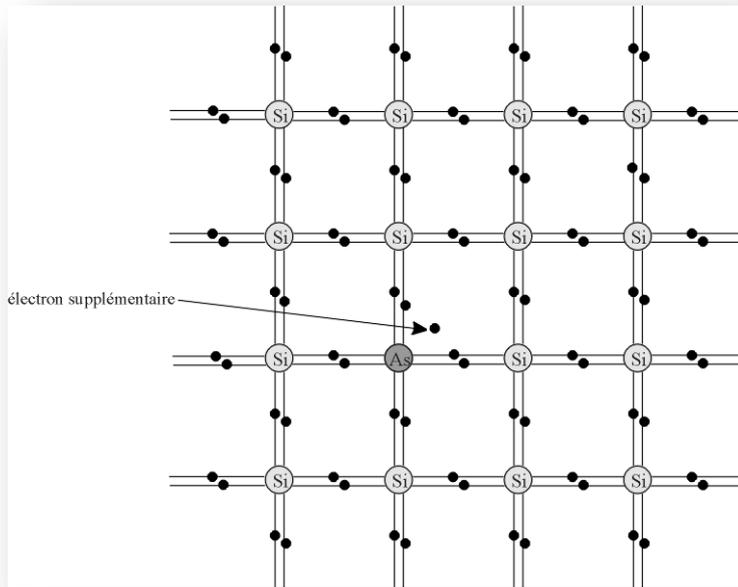


# Semi-conducteurs dopés

Dopage N

SiAs

Porteurs majoritaires : électrons (donneurs)

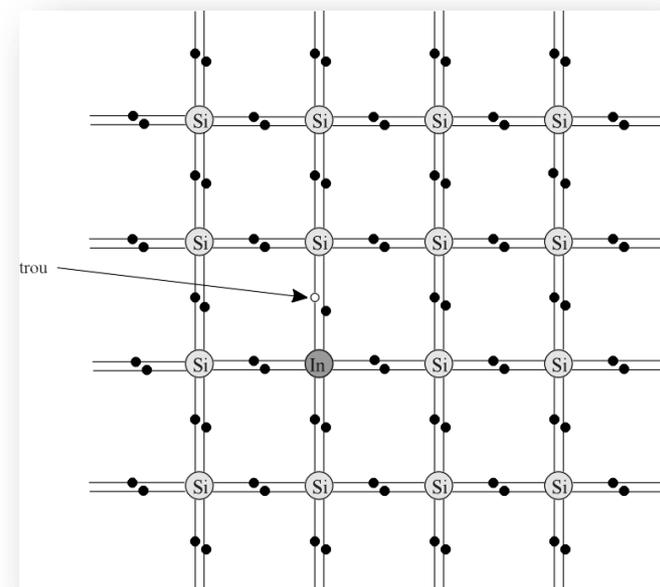


$$N_d - N_a \gg 0$$

Dopage P

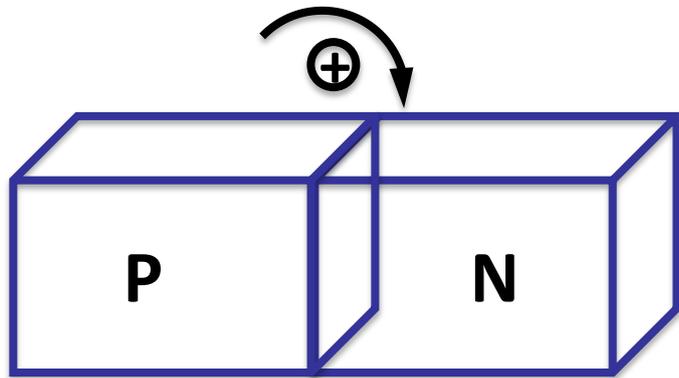
SiIn

Porteurs majoritaires : trou (accepteurs)

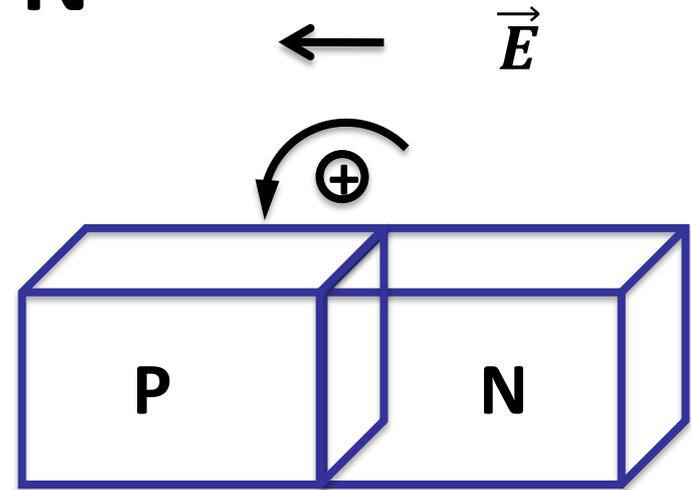


$$N_d - N_a \ll 0$$

# Jonction P-N

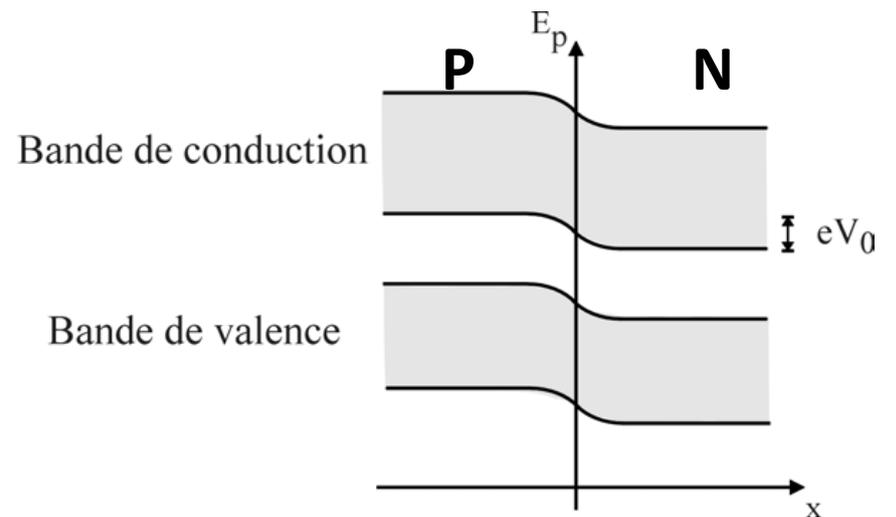
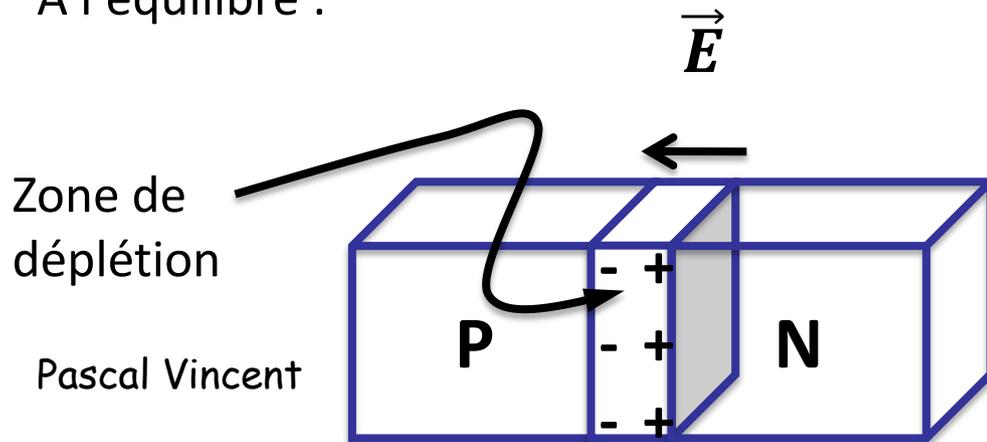


Diffusion des porteurs majoritaires

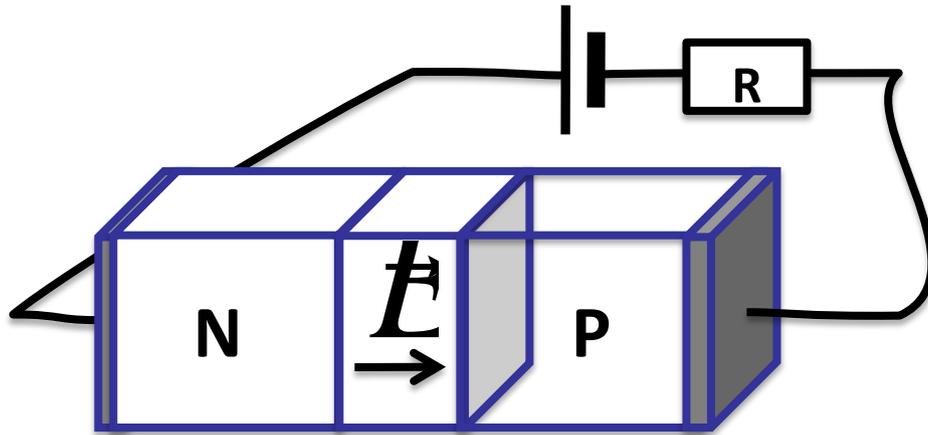


dérive des porteurs minoritaires

A l'équilibre :

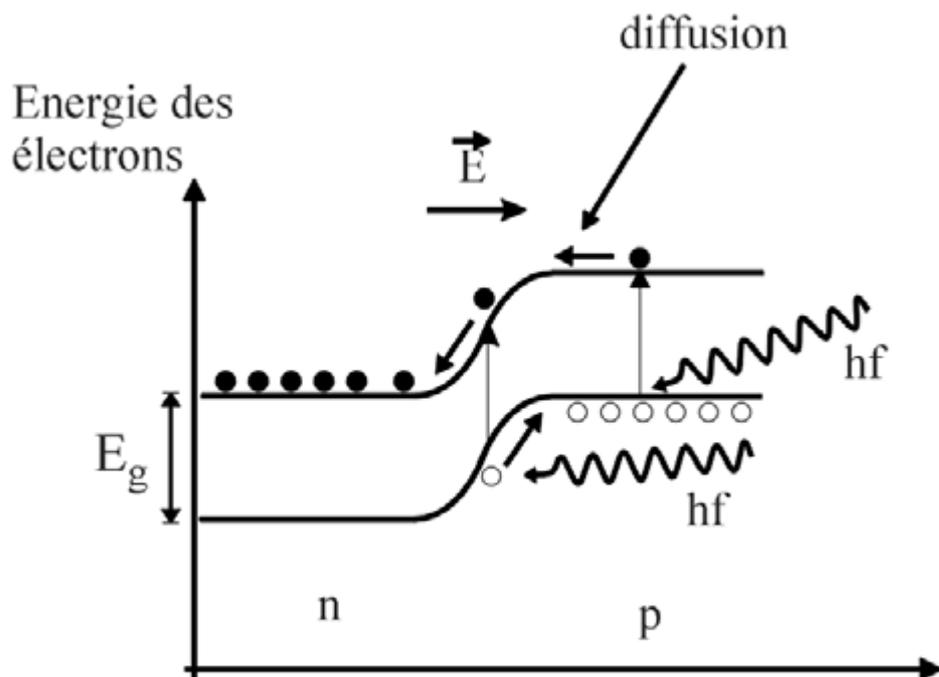


# Jonction P-N en polarisation inverse



Polarisée en inverse (sens bloquant), la zone de déplétion croit sous l'apport de charges négatives sur la zone P.

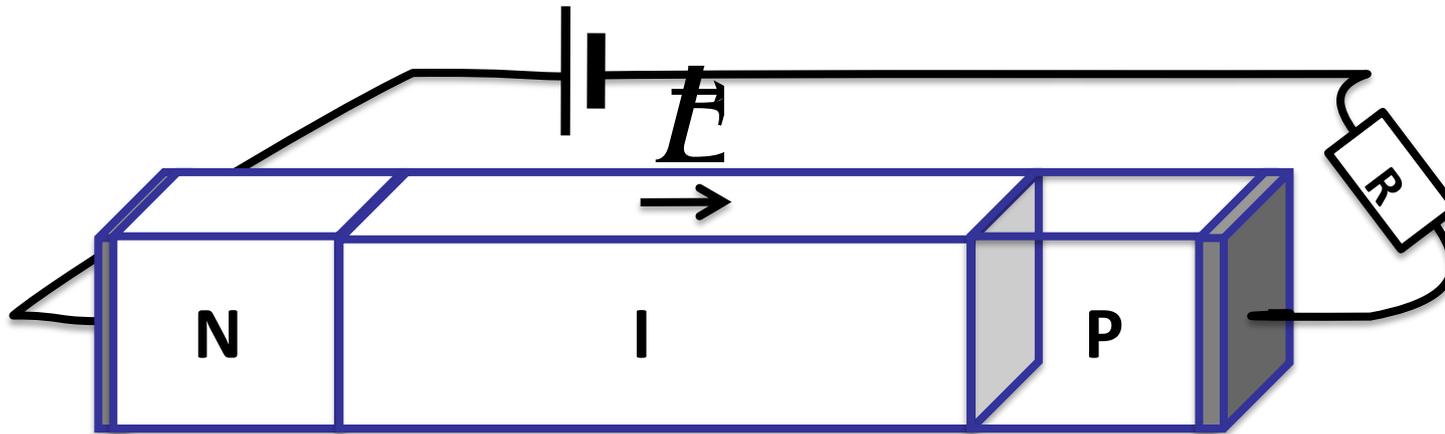
Un photon arrivant dans la zone deplétée crée une paire électron-trou qui est directement **accéléré** sous l'effet du champ E.



Un photon arrivant dans les zone P ou N produira une paire électron-trou. Puis, l'électron et le trou **diffusent** dans le semi-conducteur.

Le temps de réponse est de l'ordre de la microseconde.

# Diode PIN

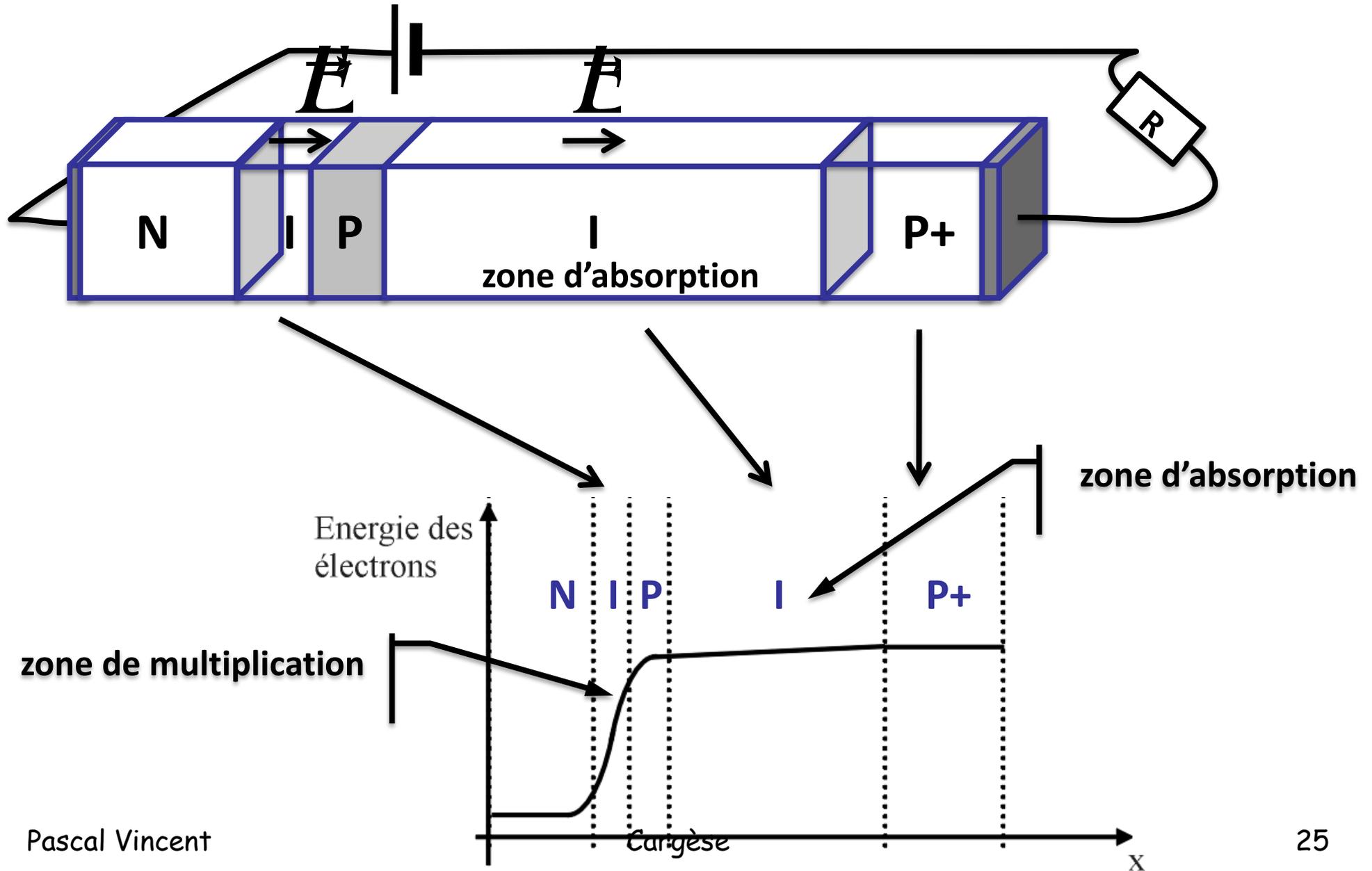


Un semi-conducteur intrinsèque (non dopé), est pris en sandwich entre deux semi-conducteur de type N et P. La concentration de charges libres dans le semi-conducteur intrinsèque est très faible : **résistivité élevée**. Le champ électrique pourra donc être grand dans cette région de résistivité élevée.

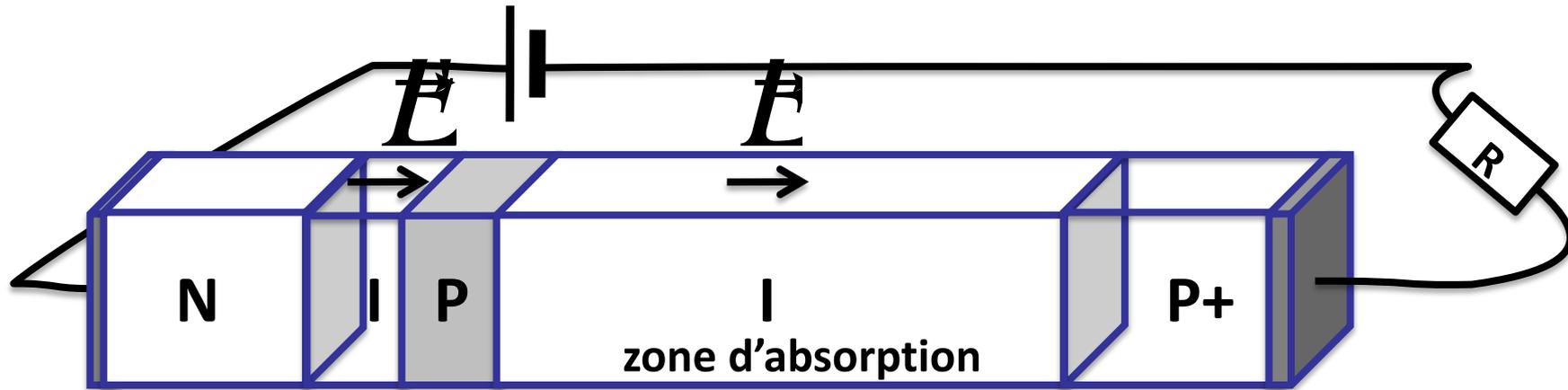
la **vitesse de dérive des charges**, proportionnelle au champ électrique, augmente. Le temps de réponse est de l'ordre de la **nanoseconde**.

Les charges + et - sont immédiatement séparées, ce qui **diminue la probabilité de recombinaison** et augmente l'efficacité du détecteur.

# Photodiodes à avalanche (APD)



# Photodiodes à avalanche (APD)

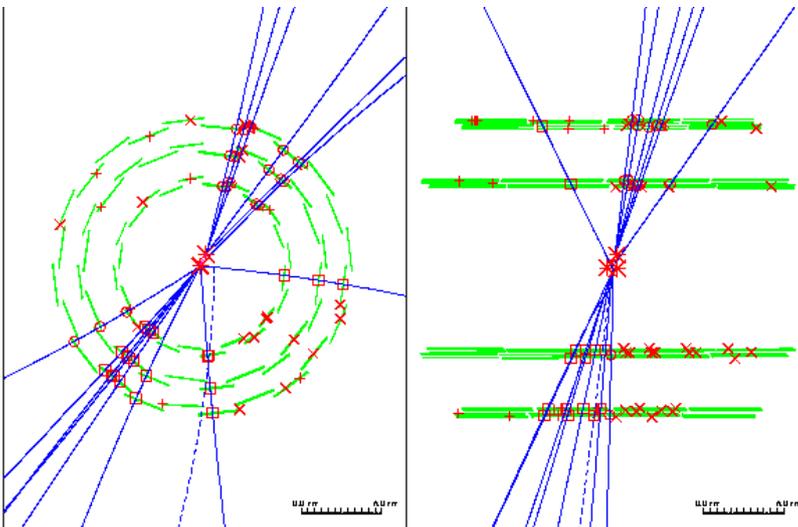
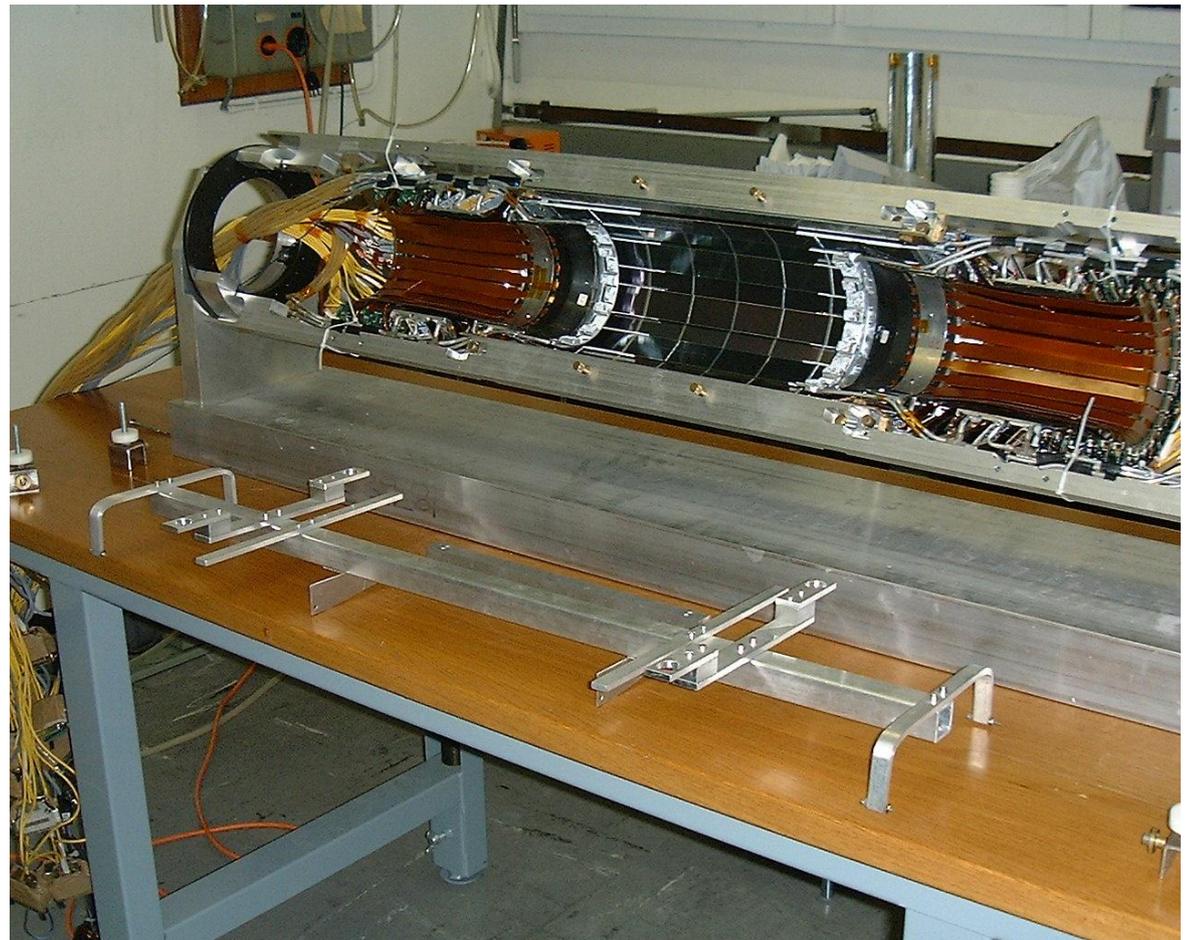
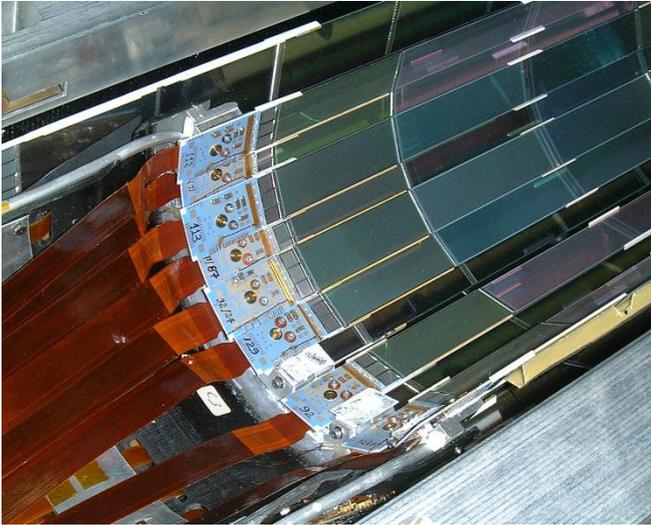
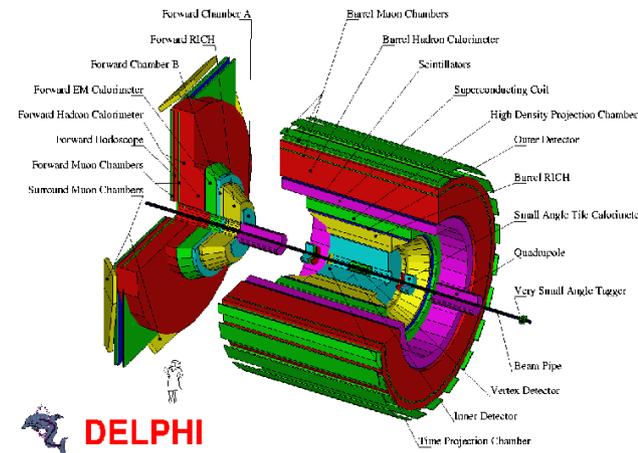


Les photodiodes à avalanche offrent une **très bonne sensibilité**, 20 à 100 fois plus qu'une diode PIN.

Elles sont **linéaires** pour des puissances optiques entre une fraction de nWatt et quelques  $\mu\text{W}$ . Pour des puissances supérieures, une diode à avalanche n'est pas nécessaire: une simple diode PIN ou pn suffit.

Leur bande passante est élevée, avec un **temps de montée** de l'ordre de quelques 100 ps.

# Micro vertex



Pascal Vincent

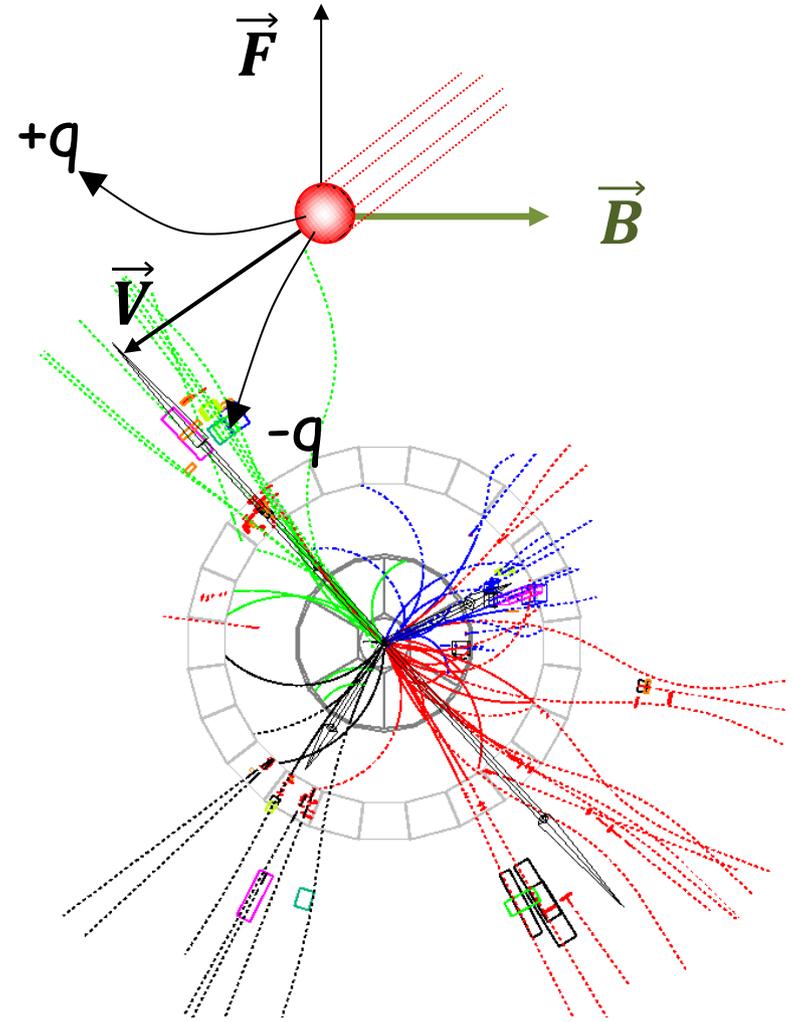
Cargèse

# DÉTERMINATION DE LA CHARGE ET DE L'IMPULSION

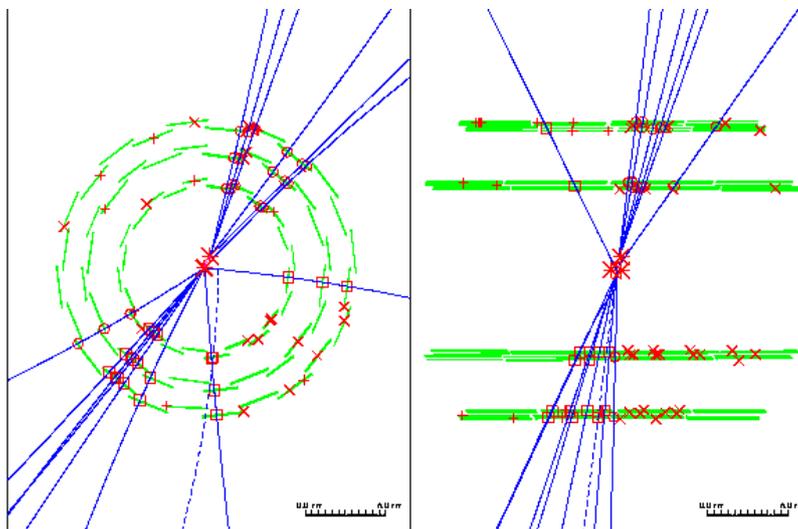
# Détermination de la charge et l'impulsion

Trajectoire de la particule dans un champ magnétique :

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



La courbure de la trajectoire donne un



termine le si

Il faut stopper complètement les particules

# MESURE DE L'ÉNERGIE

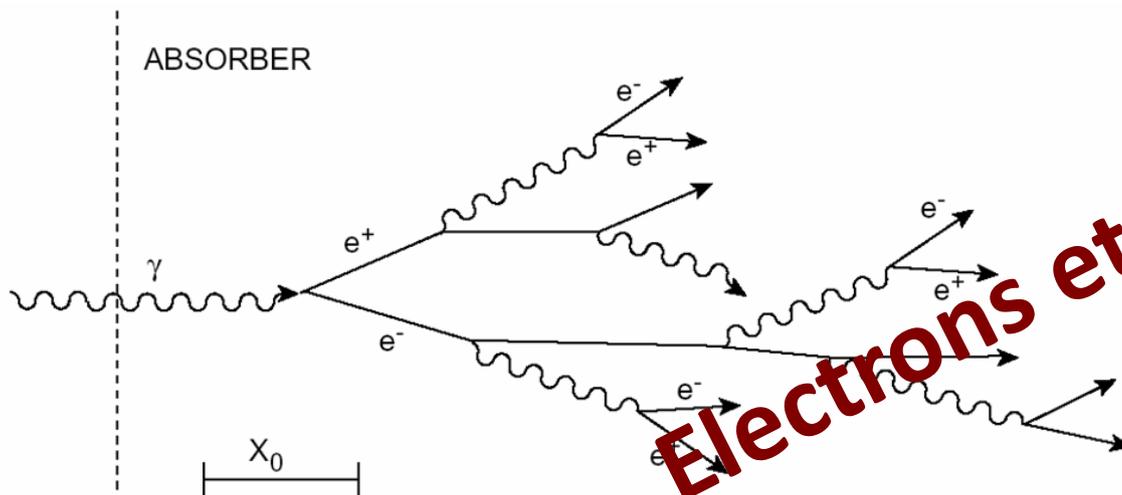


# Gerbes électromagnétiques

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 définit par :

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

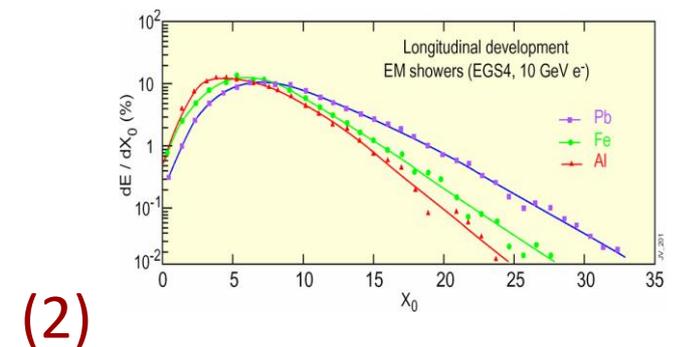
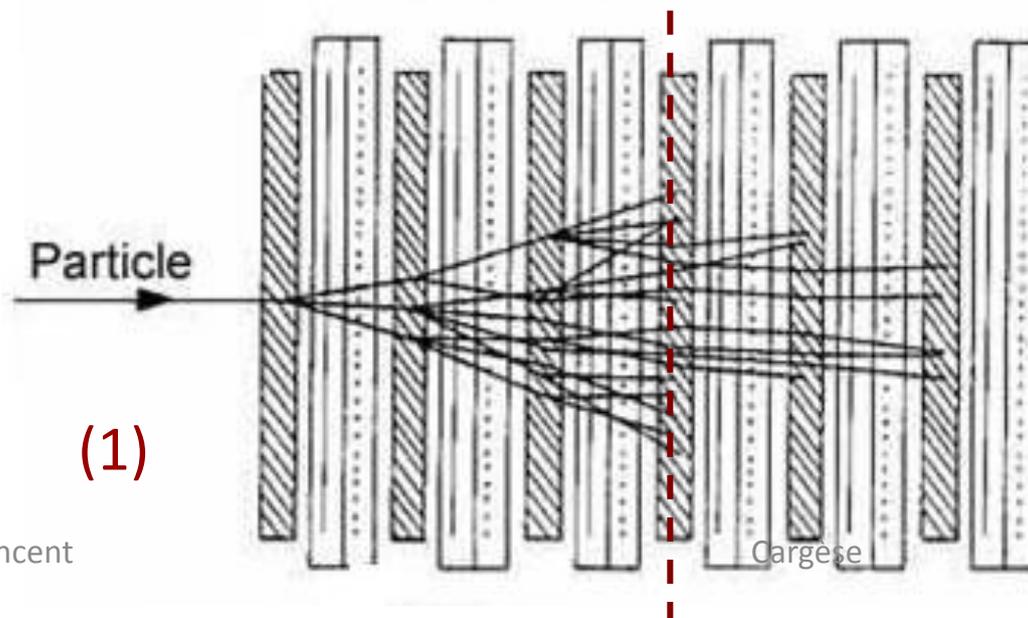
La combinaison de ces deux effets résulte en la formation d'une **gerbe électromagnétique** quand un électron ou un photon entre dans un milieu dense.



# Gerbes électromagnétiques

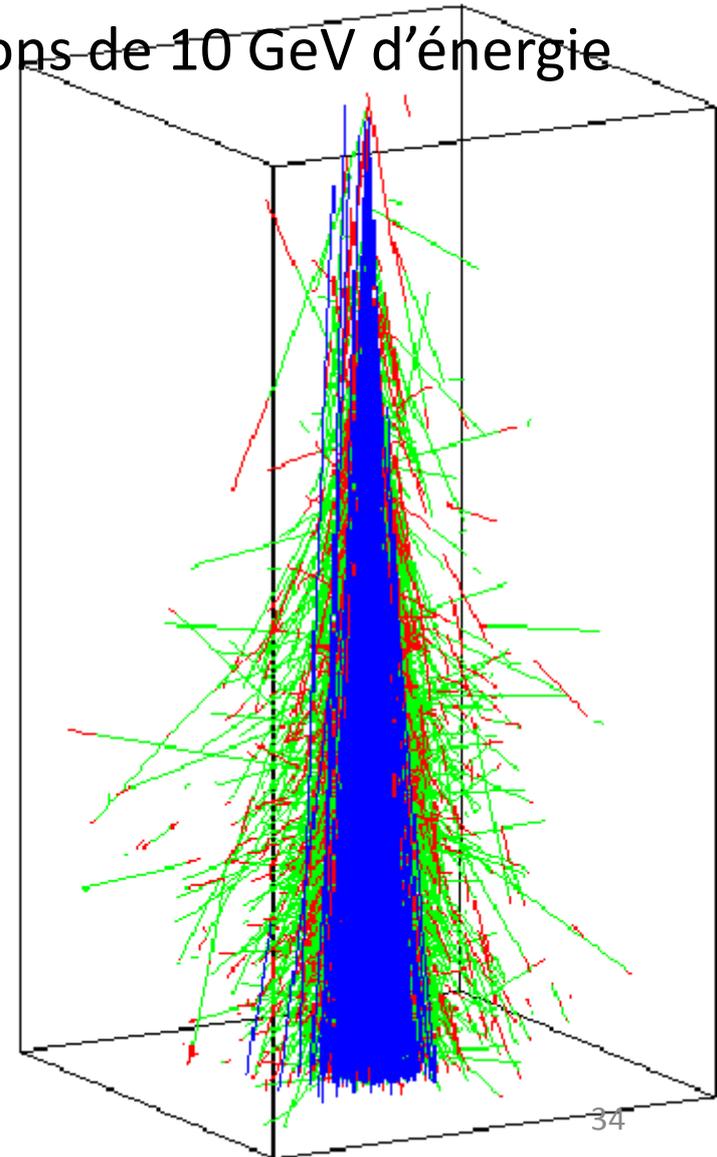
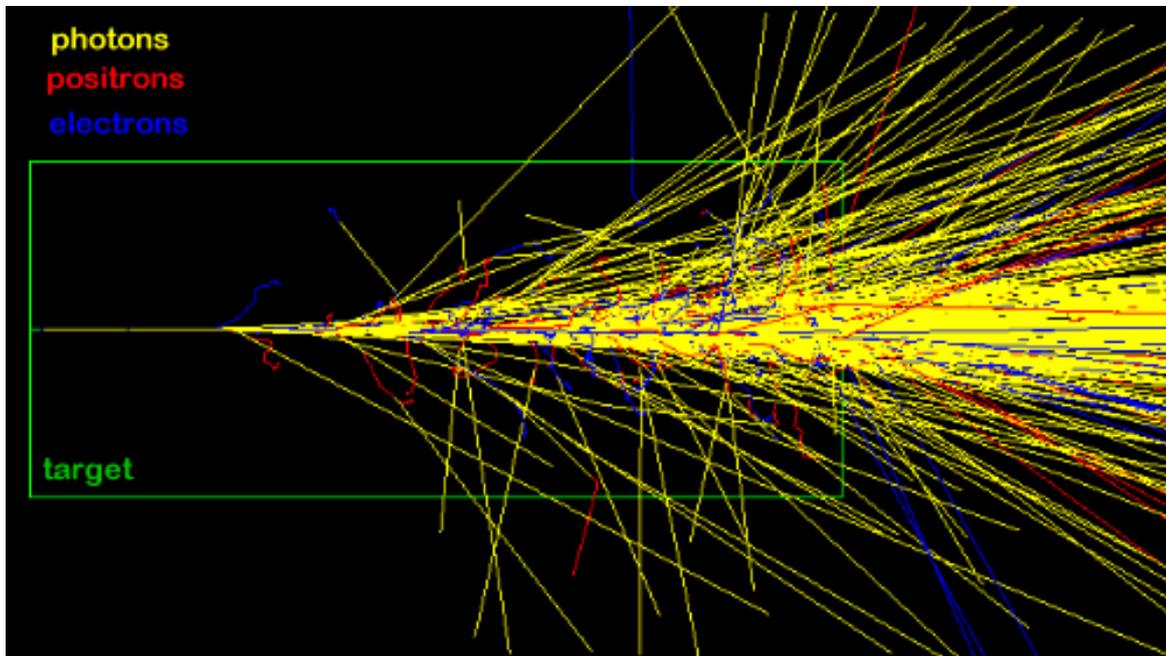
Le développement de la gerbe électromagnétique est un processus statistique (le calcul rigoureux est effectué par simulation Monte Carlo). Utilisons un modèle simplifié :

- 1) Un électron, avec  $E > E_C$ , perd  $E/2$  par Bremsstrahlung en produisant un photon, après avoir traversé une distance  $X_0$  (la perte d'énergie par ionisation est négligée pour les électrons avec  $E > E_C$ ). Un photon, avec  $E > 2m_e$ , produit une paire  $e^+e^-$ , après avoir traversé une distance  $X_0$ .
- 2) Les électrons avec  $E < E_C$  perdent complètement leurs énergies par ionisation (la perte par Bremsstrahlung est alors négligeable).



# Gerbes électromagnétiques

Simulation de gerbe électromagnétique d'électrons de 10 GeV d'énergie incidente :



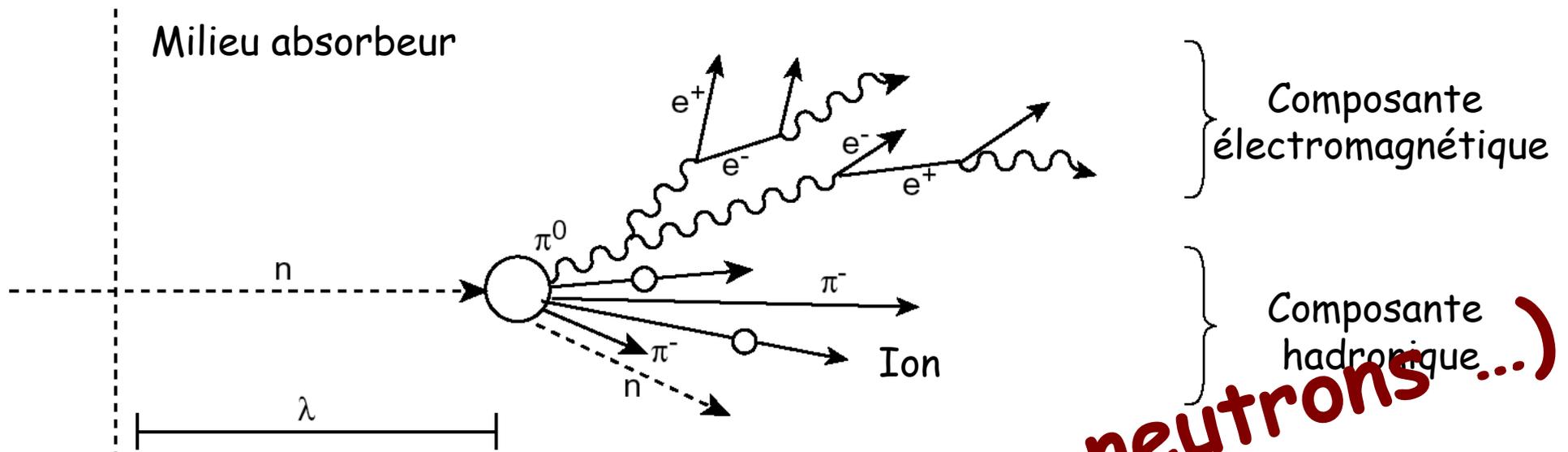
# Interactions hadroniques

Un hadron perd son énergie par **interaction nucléaire** avec les noyaux du milieu. La probabilité (section efficace) de ces processus est faible mais l'énergie perdue est forte. Les processus de perte d'énergie des hadrons dans la matière sont :

- ❖ La fragmentation du noyau cible.
- ❖ La perte d'énergie des produits de l'interaction par ionisation
- ❖ La production et la désintégration de  $\pi^0$  en deux photons (induisant une composante électromagnétique à la gerbe).
- ❖ La production de neutrinos

Les **processus sont complexes** et la recherche de solution analytique n'est pas envisageable. On utilise des **simulations Monte Carlo** basées sur des relations empiriques pour reproduire les distributions longitudinales et transverses du développement de la gerbe.

# Gerbes hadroniques



**Hadrons (protons, ions, neutrons...)**

# Interactions hadroniques

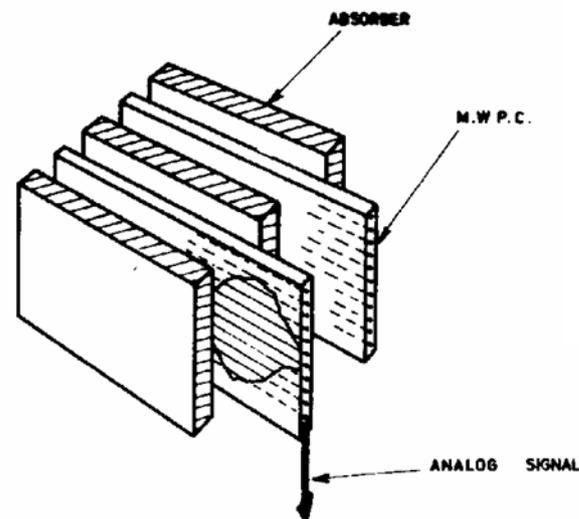
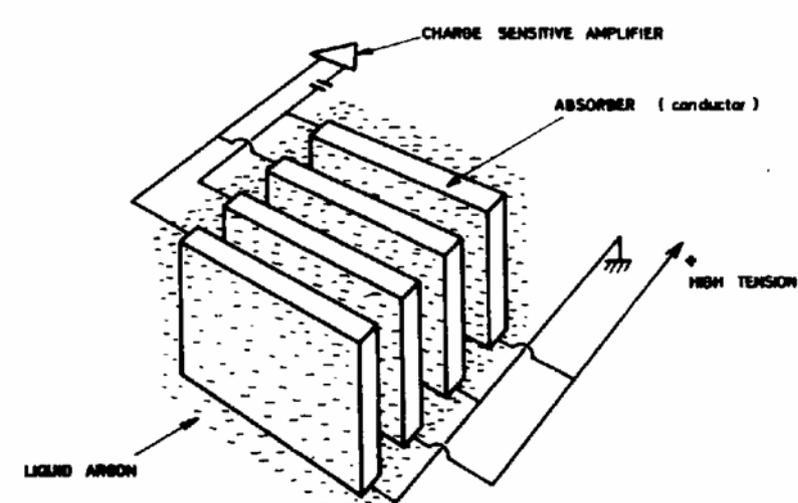
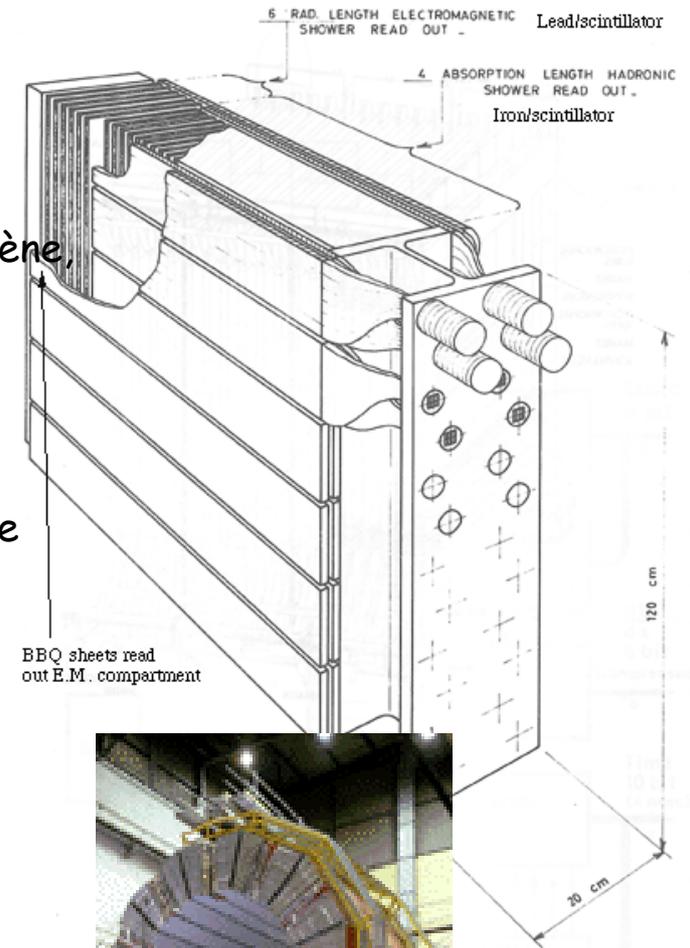
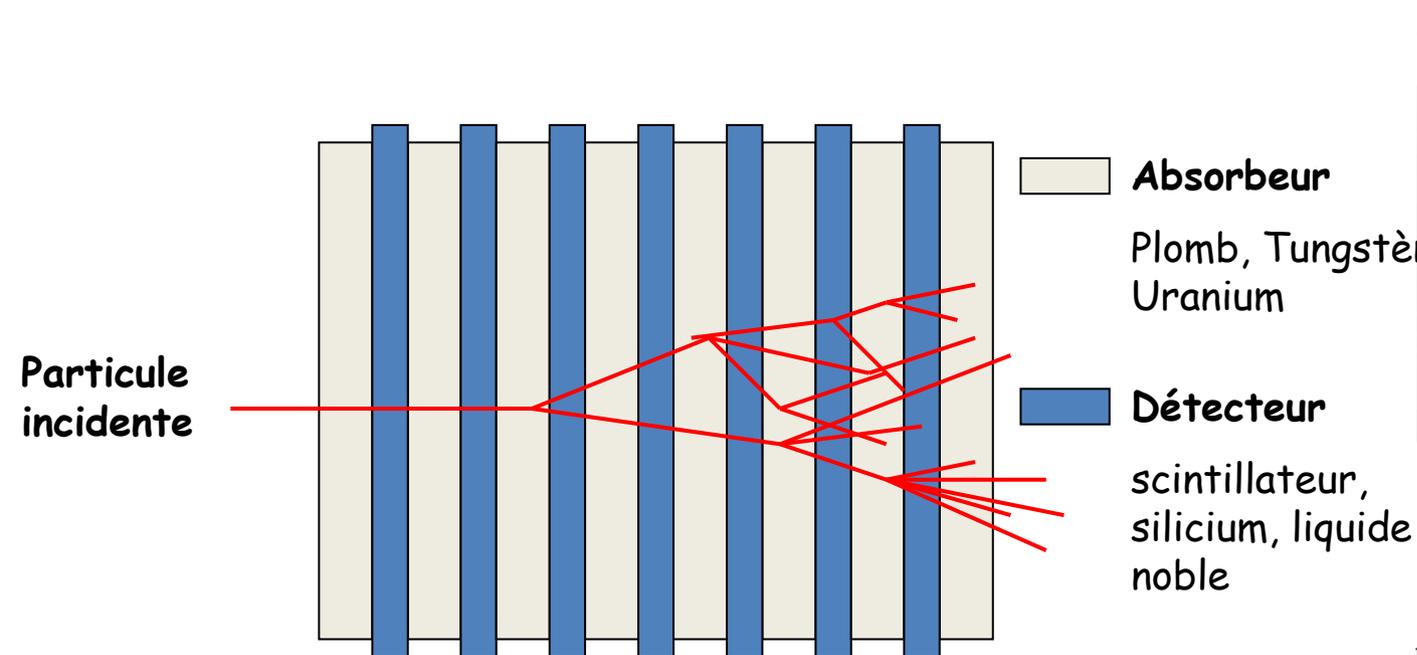
Le développement longitudinal est caractérisé par la longueur d'interaction nucléaire :

$$\lambda = \frac{A^{1/3}}{\sigma_0 \rho}$$

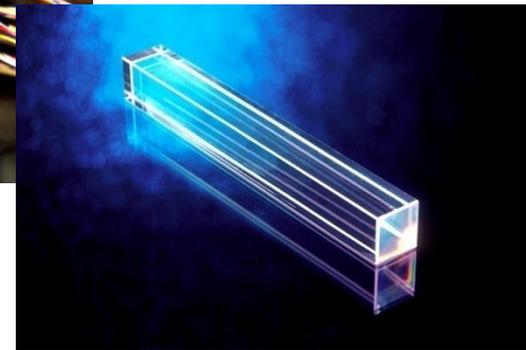
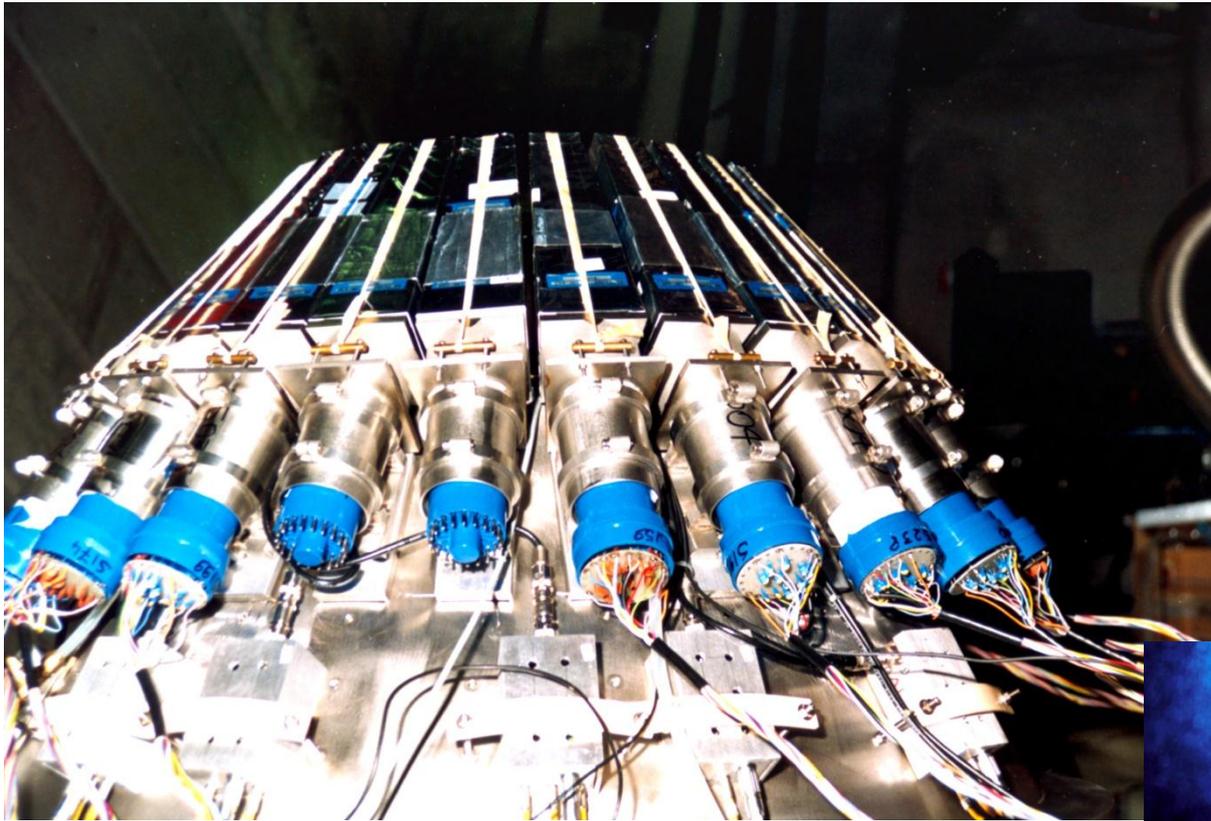
La section efficace,  $\sigma_0$ , dépend de la particule incidente.

$$\lambda_{\text{Pb}}^{\text{proton}} = 18 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\text{Al}}^{\text{p}} = 39 \text{ cm}$$

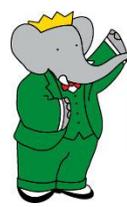
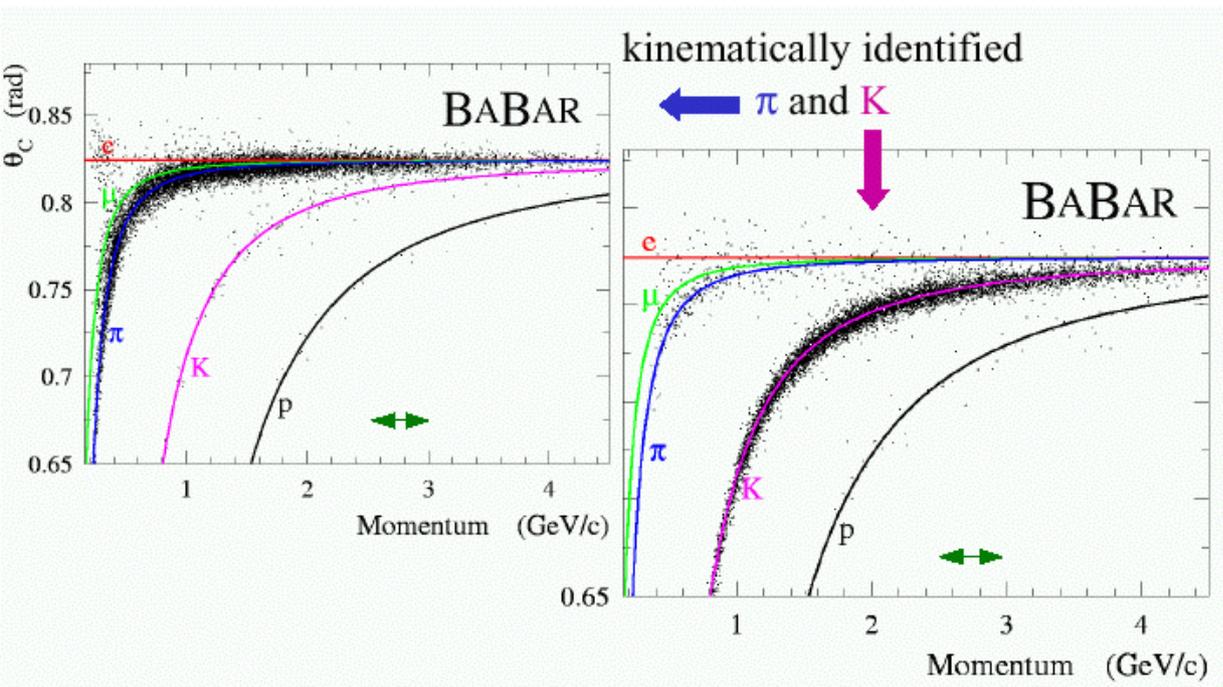
# Détecteurs à échantillonnage



# Détecteurs homogènes



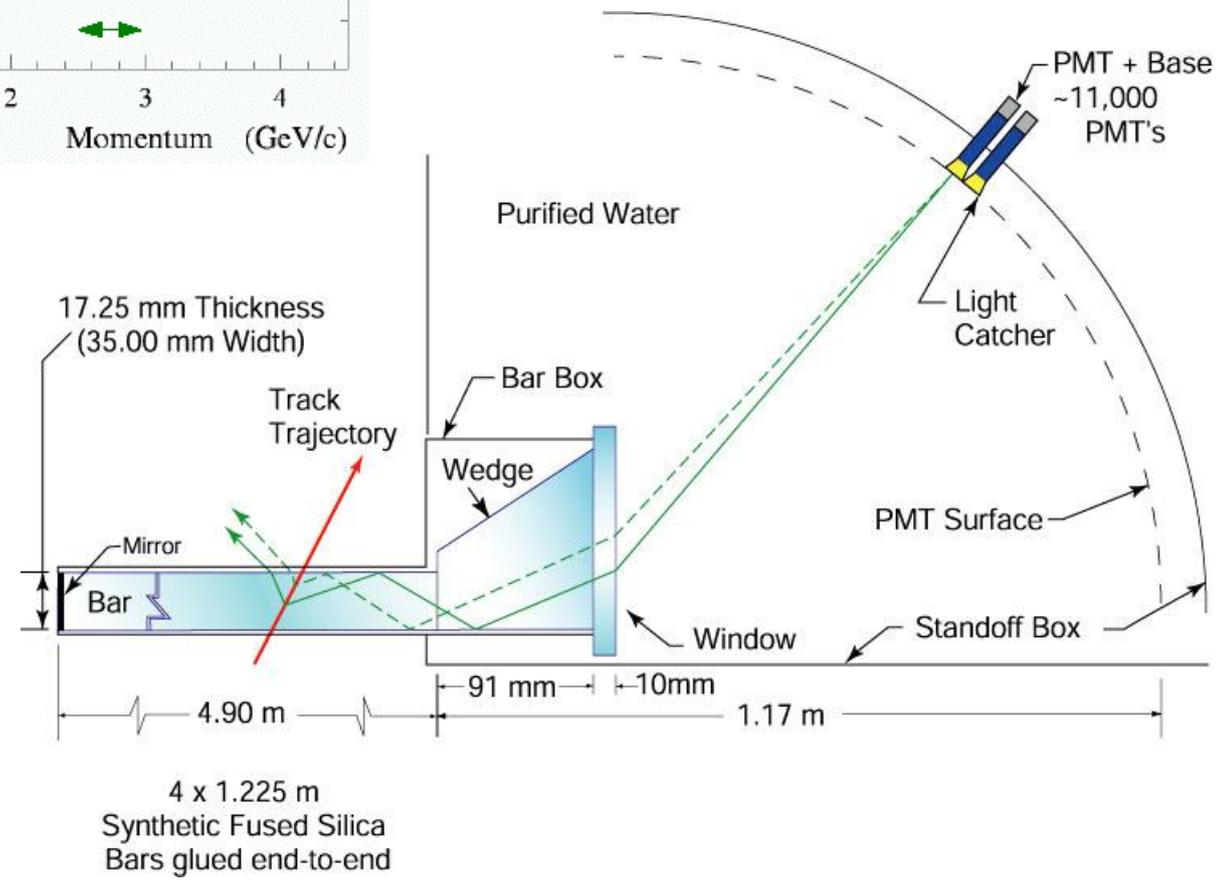
# IDENTIFICATION DES PARTICULES



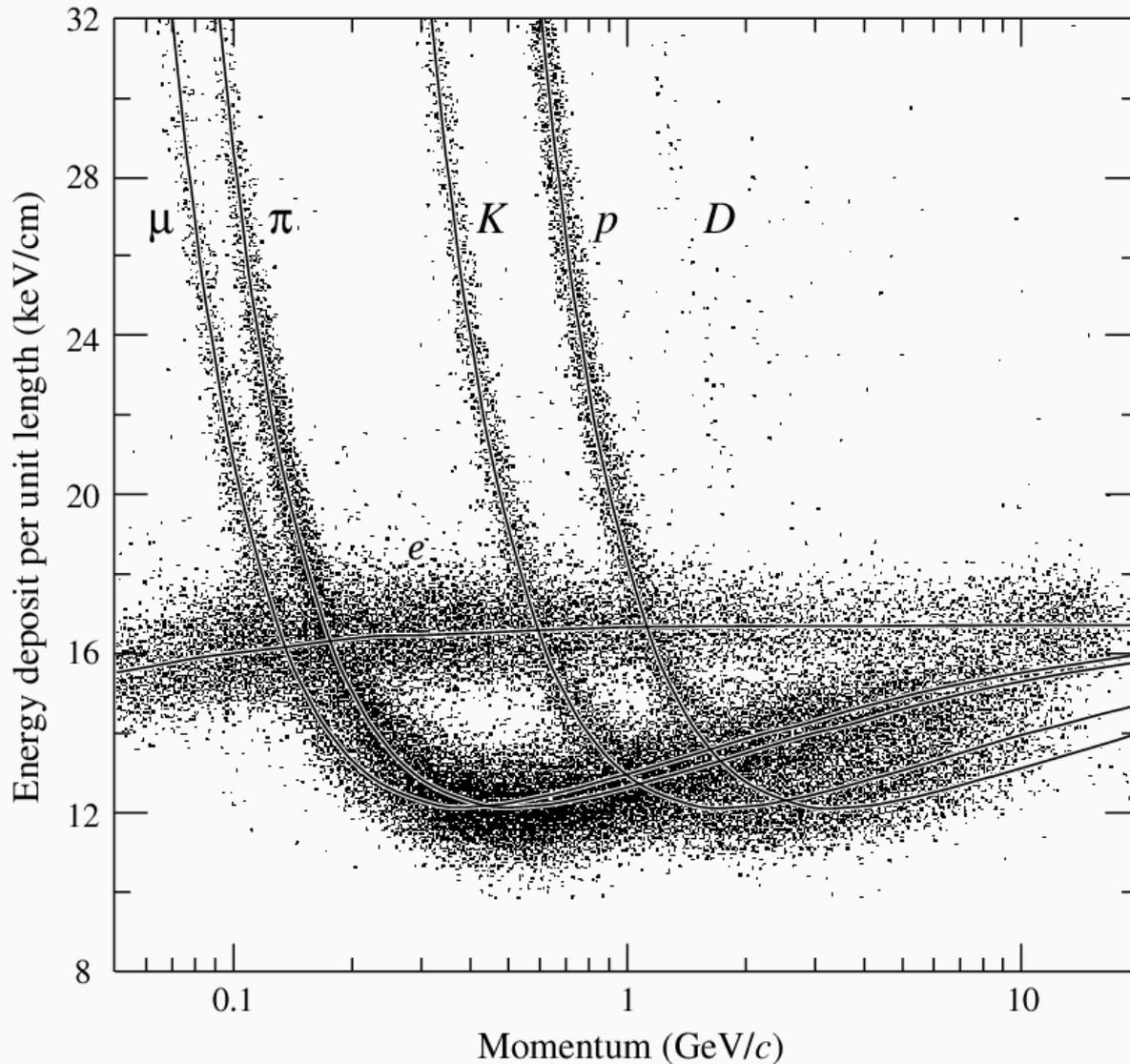
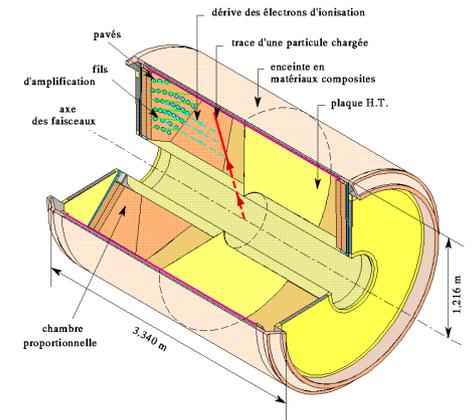
**Je suis  
BABAR**

Les photons émis sont piégés dans la barre par réflexion.

Un prisme joue le rôle du miroir



# Mesure du $dE/dx$



Mesure moyenne sur les 192 fils de la TPC →  
Erreur statistique

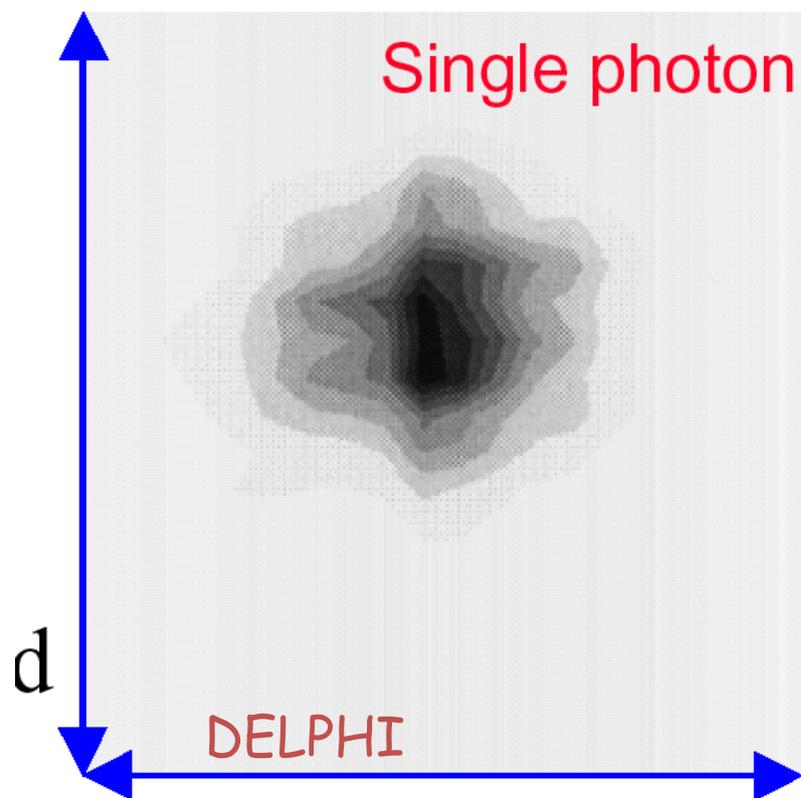
Le gain doit être très bien déterminé → Erreur systématique.

La séparation n'est jamais totale

# Les calorimètres

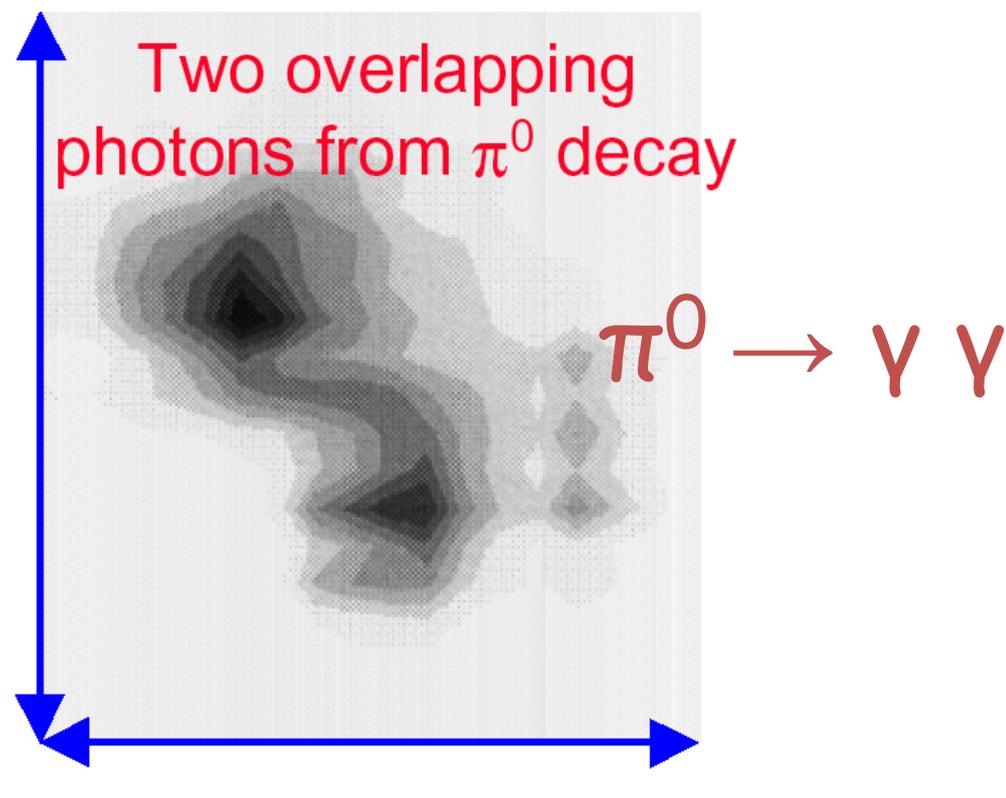
Avec une bonne granularité il est possible de distinguer les deux photons issus de la désintégration de  $\pi^0$ .

(A. Algeri et al. CERN-PPE/95-04)



!

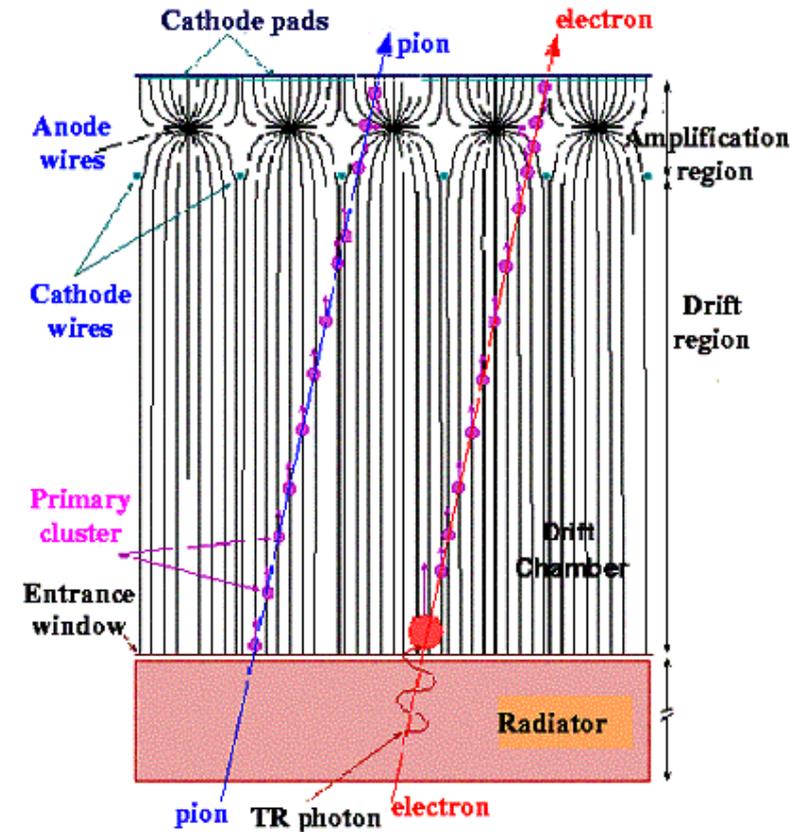
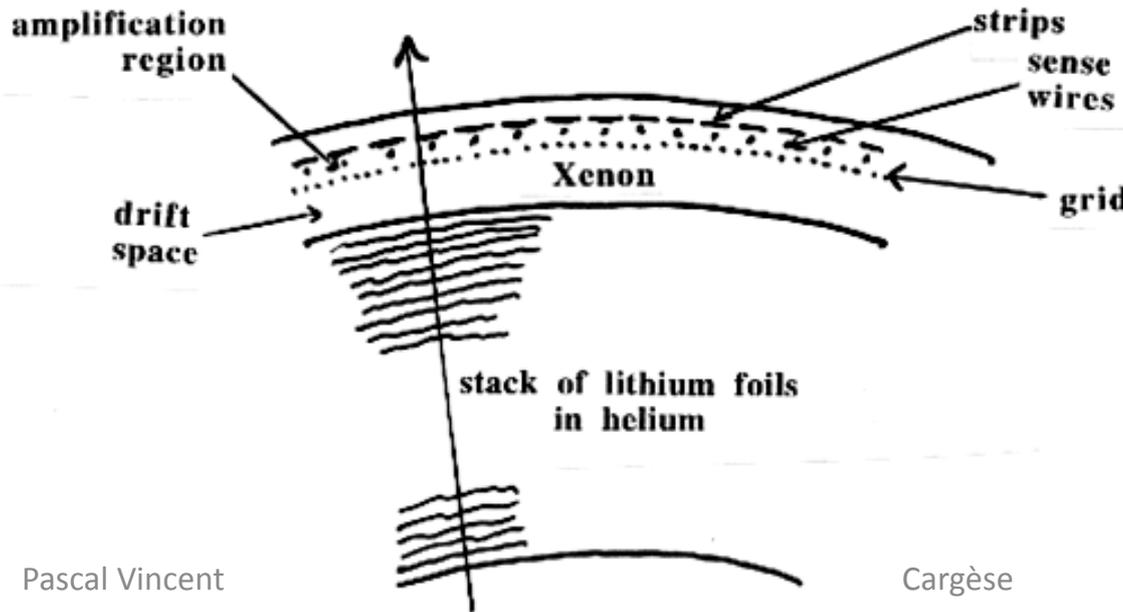
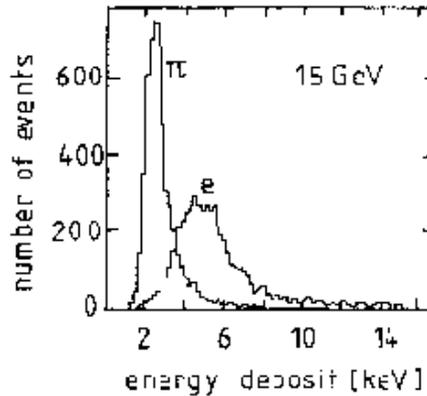
$$\Delta\varphi \times \Delta\theta = 1^\circ \times 1^\circ$$



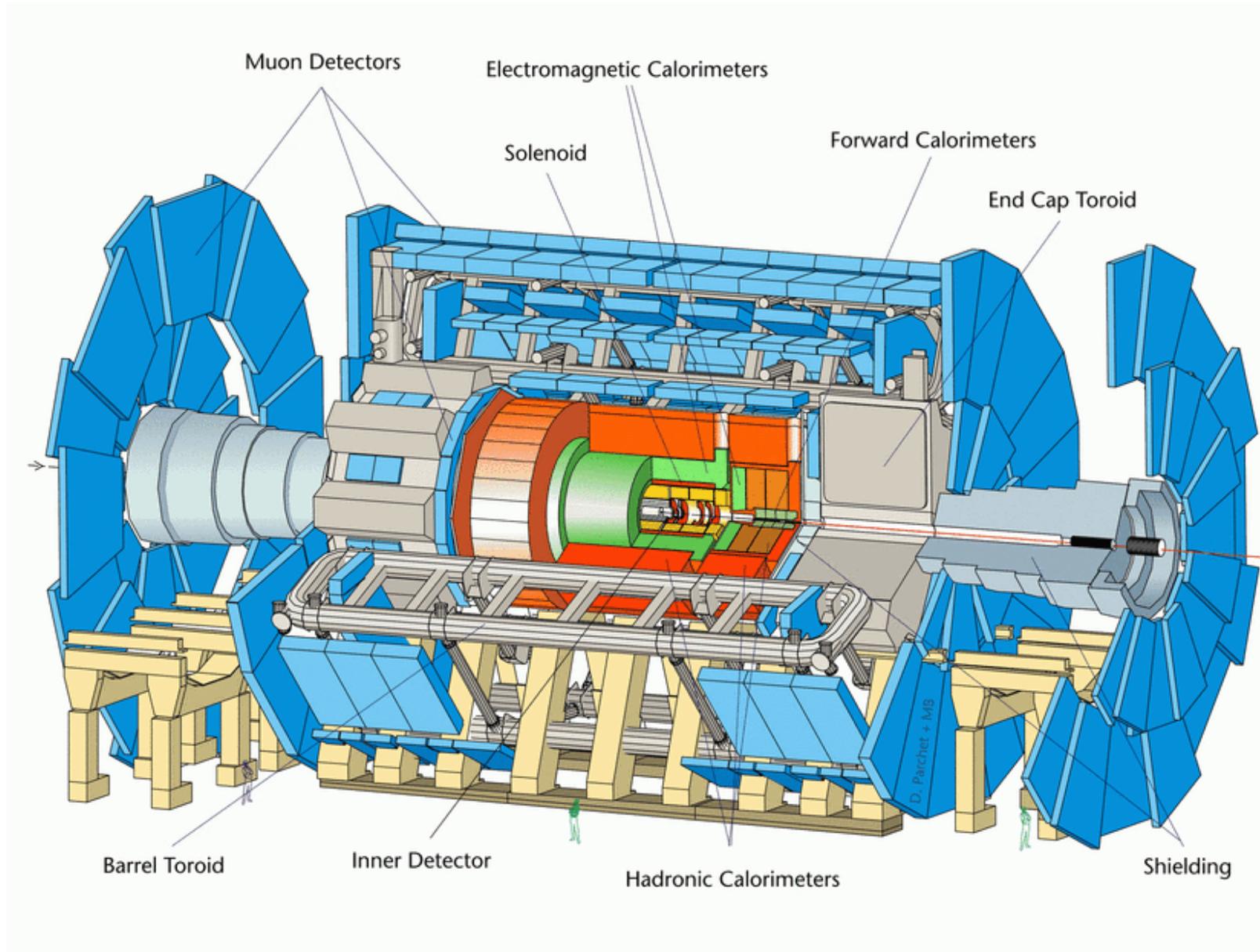
$$\Delta\varphi \times \Delta\theta = 1^\circ \times 1^\circ$$

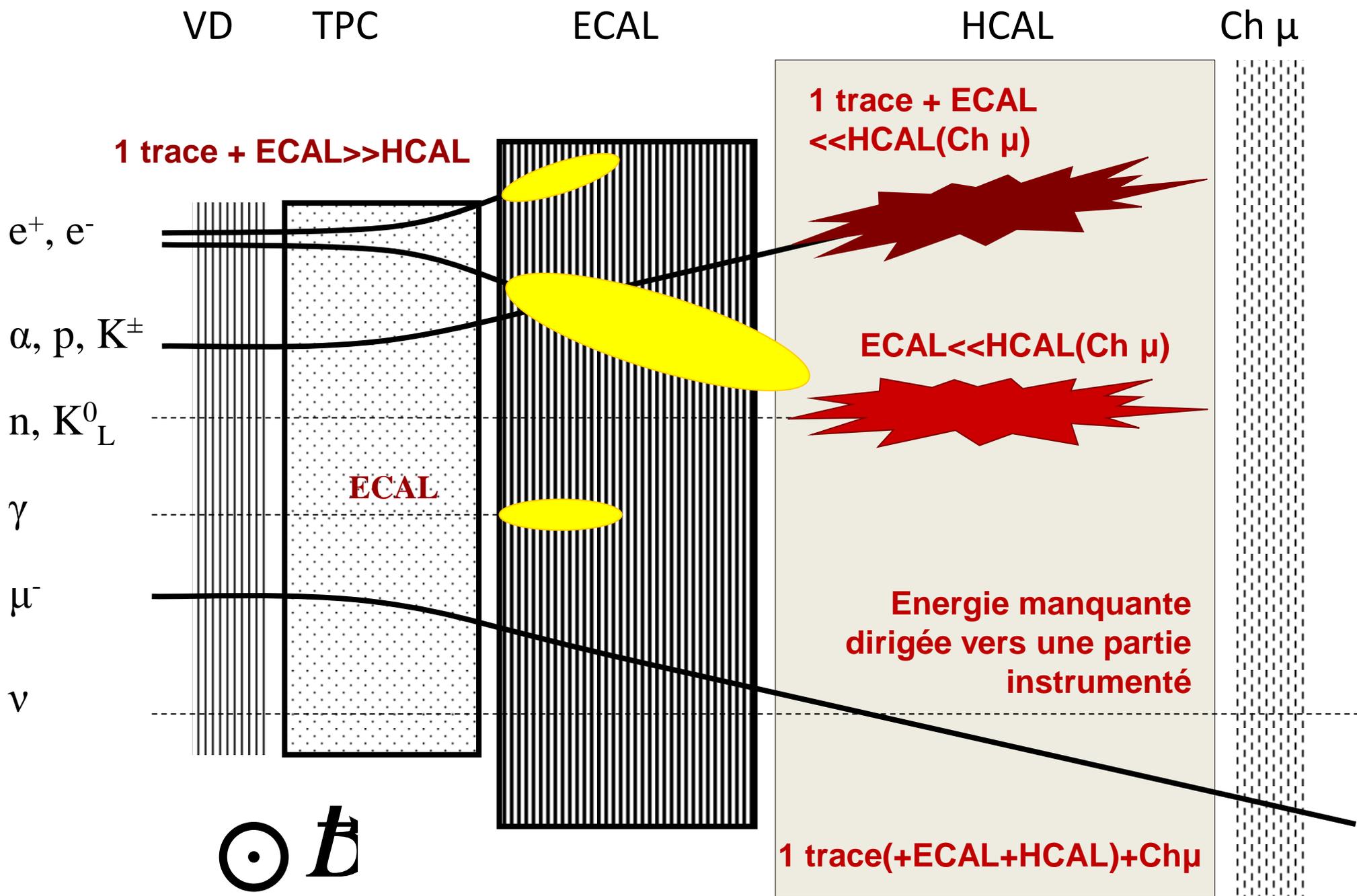
# Le rayonnement de transition

Identification des electrons :

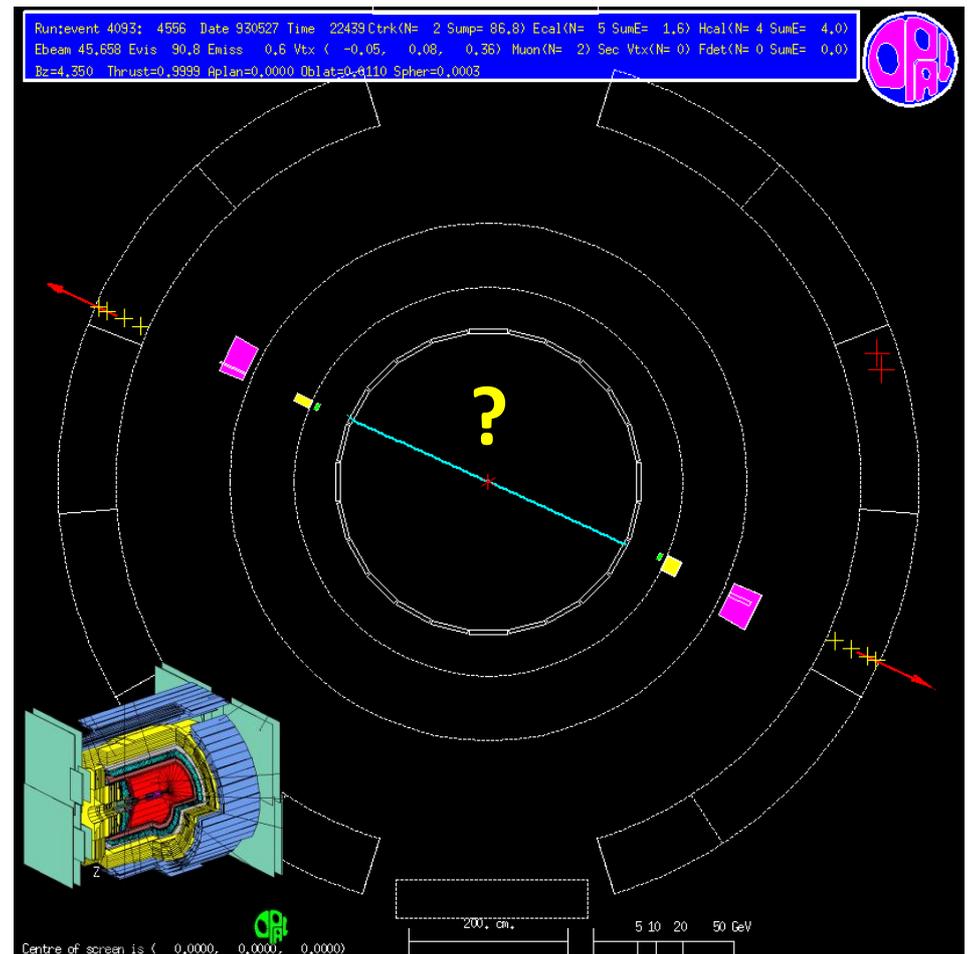


# Détecteur $4\pi$





# Les particules que l'on ne détectent pas



# Les particules instables

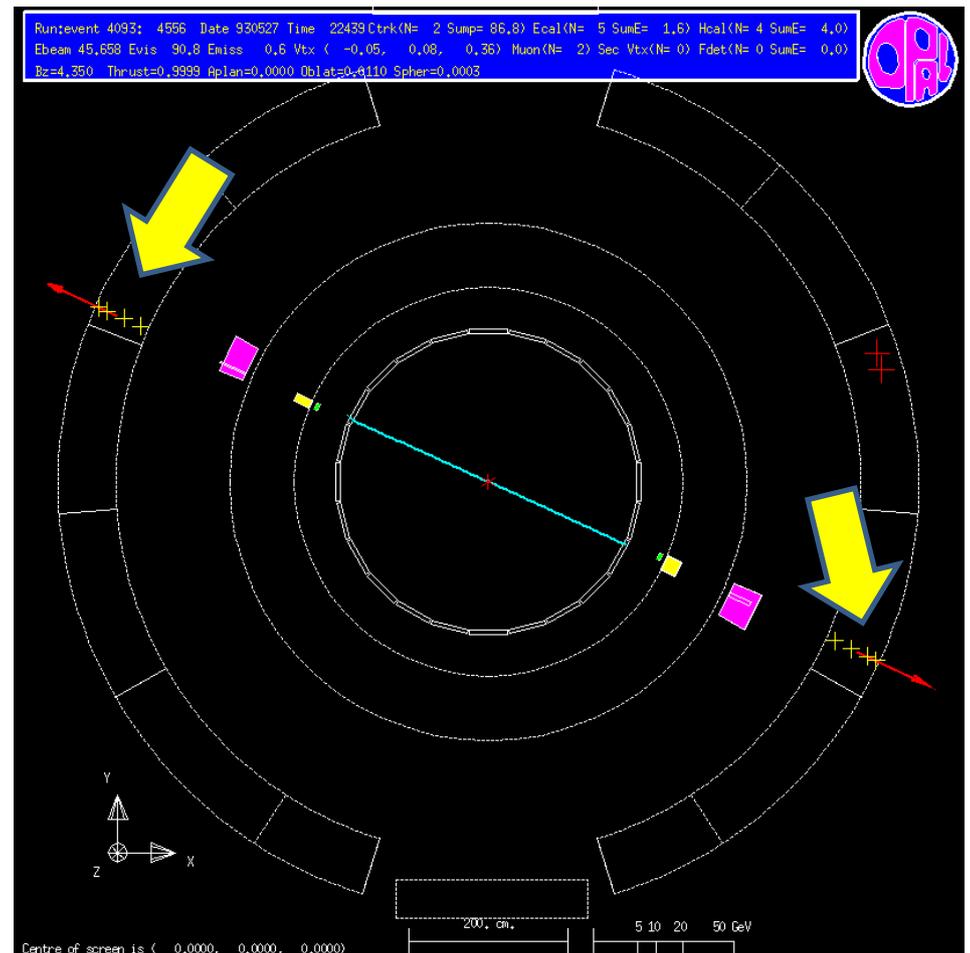
Les particules ne sont pas stoppées, ce sont **des muons** avec une très forte probabilité.

$$\mu^+ \leftarrow ? \rightarrow \mu^-$$

L'impulsion est mesurée et la masse déterminée par identification des deux particules.

$$(\vec{P}_1; m_\mu) \Rightarrow E_1 = \sqrt{P_1^2 + m_\mu^2}$$

$$(\vec{P}_2; m_\mu) \Rightarrow E_2 = \sqrt{P_2^2 + m_\mu^2}$$

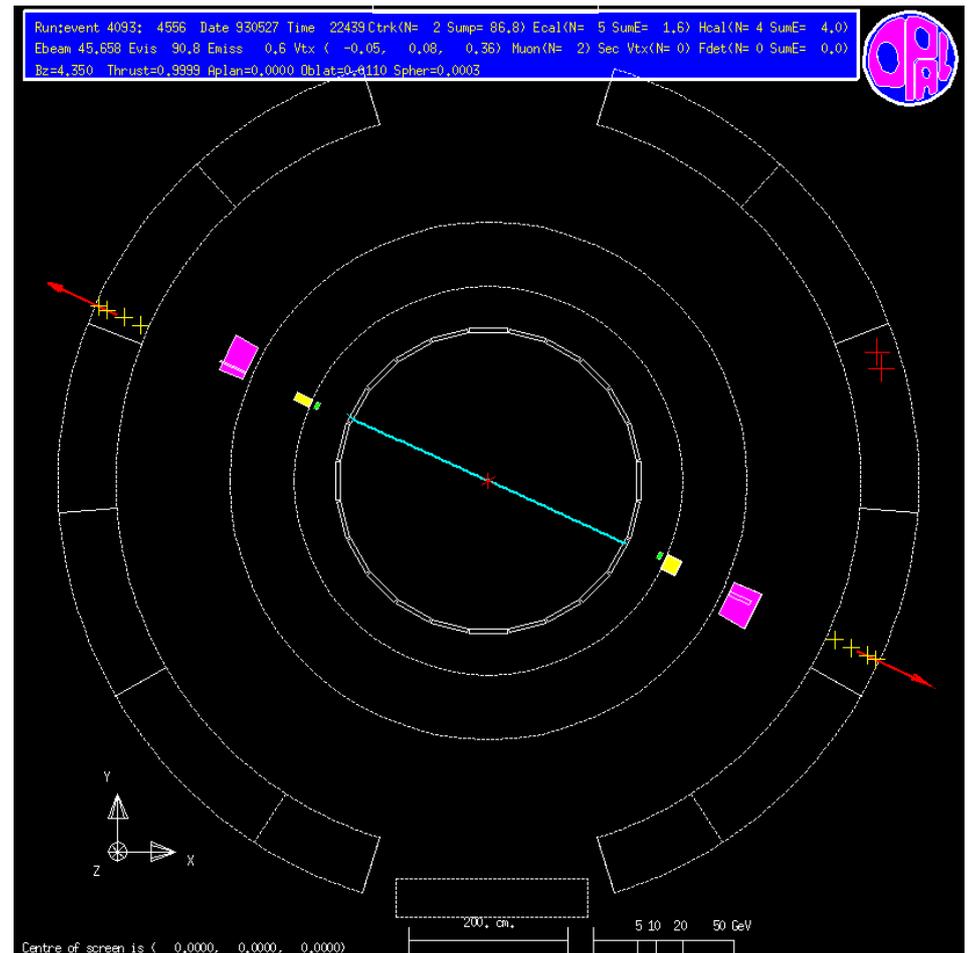
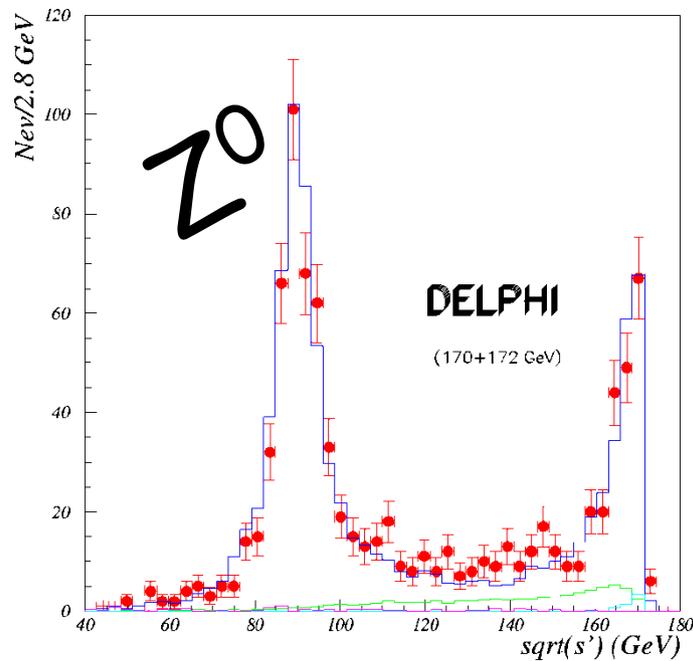


# Les particules instables

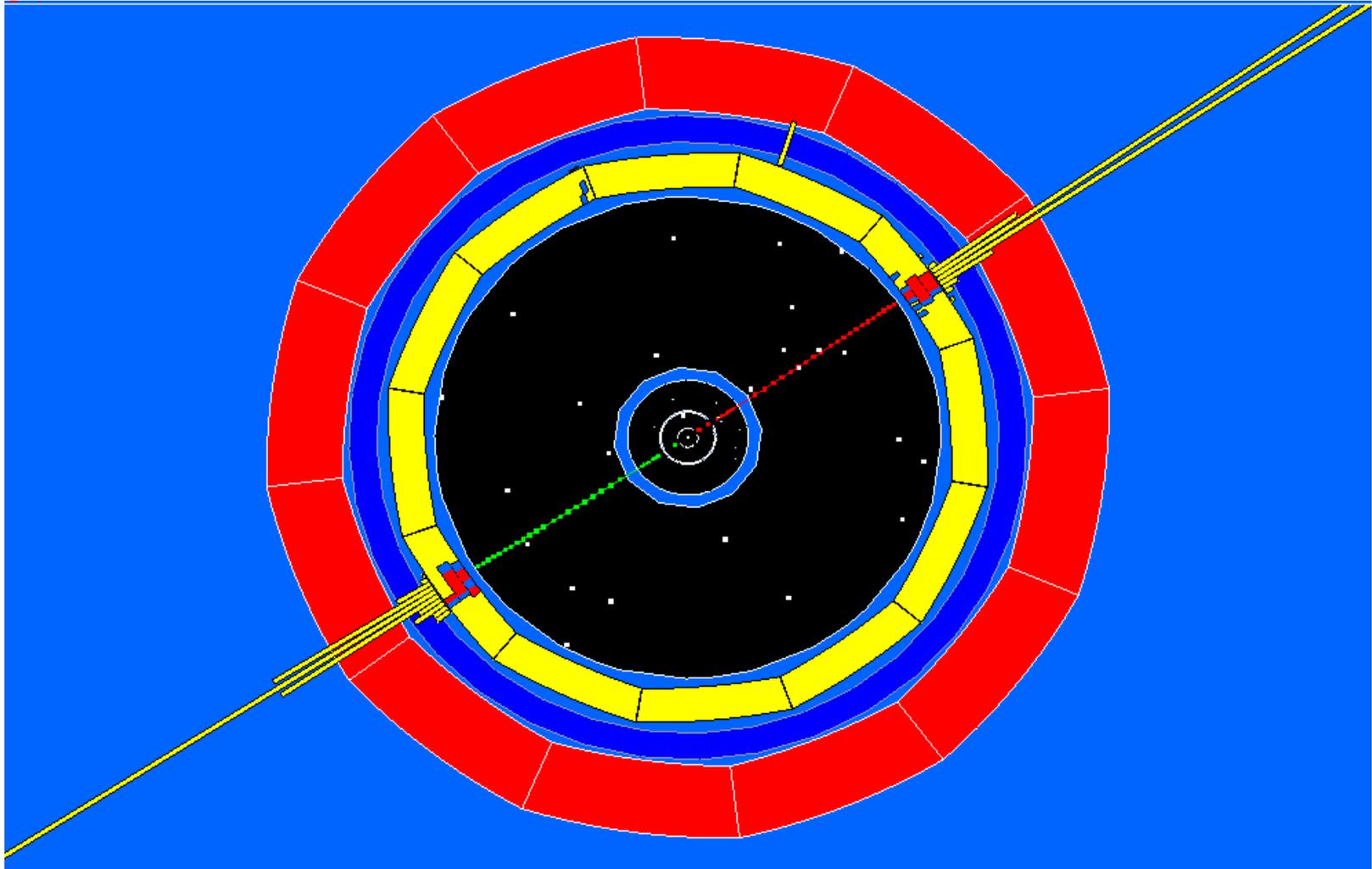
Conservation de l'énergie (4-moment) :

$$P_{CM}^{i2} = P_{CM}^{f2}$$

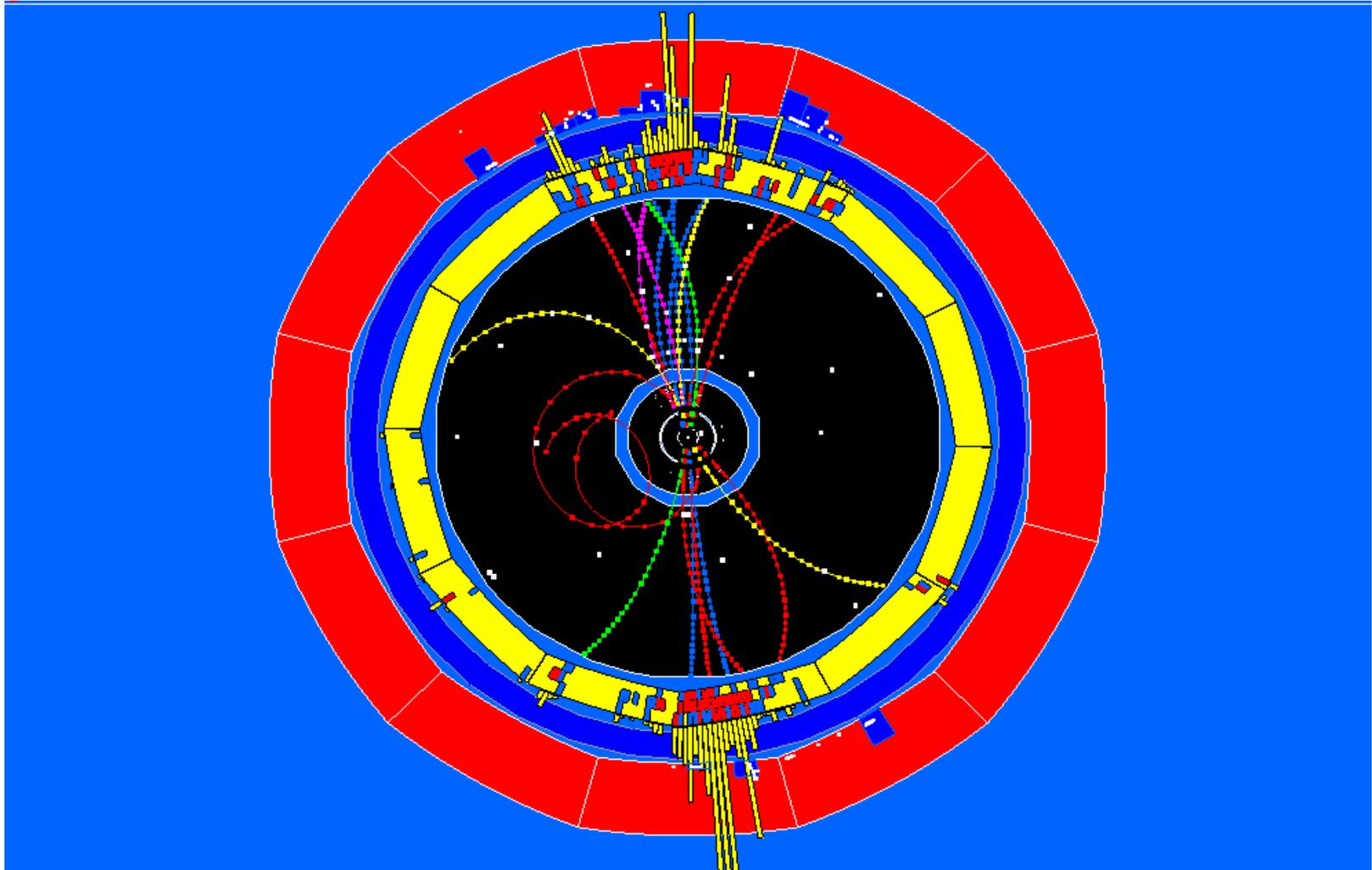
$$-m_z^2 = (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2 - (E_1 + E_2)^2$$



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



$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow qq \rightarrow \text{hadrons}$



**A suivre ...**