

# INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIERE, DETECTEURS

Divic Rapin, DPNC, Université de Genève

Journée de formation continue, 27 février 2008

## – INTERACTIONS:

- Ordres de grandeur
- Perte d'énergie ( $dE/dx$ ) par ionisation, Bethe-Bloch
- Cas des électrons, Bremsstrahlung
- Interaction des photons (X, gamma)
- Gerbes électro-magnétiques
- Interactions hadroniques (nucléaires)

## – DETECTEURS:

- Détecteurs à scintillation
- Détecteurs à gaz
- Détecteurs semi-conducteurs
- Détecteurs à effet Cherenkov et radiation de transition
- Exemples: ATLAS, ATLAS

• Vitesse:  $\beta = v/c$

• Impulsion:  $p = \beta \gamma M c$

• Energie totale:  $E_T = \gamma M c^2$

Facteur Lorentz:  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$

Energie cinétique:  $E_{\text{cin}} = (\gamma - 1) M c^2$

# ORDRES DE GRANDEURS

- Atomes

- *Distances*:  $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$
- *Réactions chimiques*:  $\sim 1 \text{ eV}$
- *Énergie de liaison des électrons*:  $10 \text{ eV}$  ( $\rightarrow 100 \text{ keV}$ , Pb-K)

- Noyaux (  $A$  nucléons,  $Z$  protons)

- *Rayon du proton*:  $\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$  (femtomètre, Fermi)
- *Rayon du noyau*:  $R_N \approx 1.1 \text{ fm} \times A^{1/3}$
- *Réactions nucléaires*: désintégrations  $\sim 1 \text{ MeV}$ , ( fission  $\sim 200 \text{ MeV}$ )
- *Énergies de liaison*:  $\sim 8 \text{ MeV / nucléon}$

- Masses

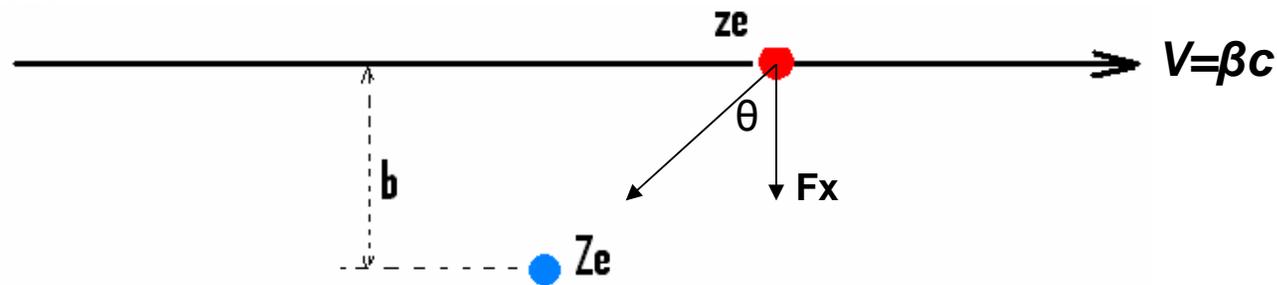
- *Electron*  $e^\pm$ :  $0.511 \text{ MeV}/c^2$
- *Nucléons* :  $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$  (proton:  $938.3 \text{ MeV}/c^2$ , neutron:  $939.6 \text{ MeV}/c^2$ )
- $\mu^\pm$ :  $106 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\pi^\pm, 0$ :  $140, (135) \text{ MeV}/c^2$ , K:  $\sim 495 \text{ MeV}/c^2$ , ...

- Constantes

- $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  (30 cm/nsec)
- $\hbar c = 197 \text{ MeV} \times \text{fm}$  ( si  $p = 1 \text{ GeV}/c$ ,  $\lambda = 1.24 \text{ fm}$  )

## INTERACTIONS DES PARTICULES CHARGÉES

- Elles interagissent toujours via le champ coulombien des noyaux et électrons.



- Force: 
$$F_x = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta = \frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 b^2} \cos^3 \theta$$

- Impulsion transverse: 
$$\Delta p = \int_{-\infty}^{\infty} dt F_x = \frac{Zze^2}{2\pi\epsilon_0 \beta c} \frac{1}{b}$$

- Chocs sur noyaux ( $M_P < M_{\text{Noyau}}$ ): *déviaton, diffusion multiple* ( $\theta = \Delta p/p$ )
- Chocs sur les électrons ( $M_P \gg m_e$ ): *ionisation, perte d'énergie de la particule.*

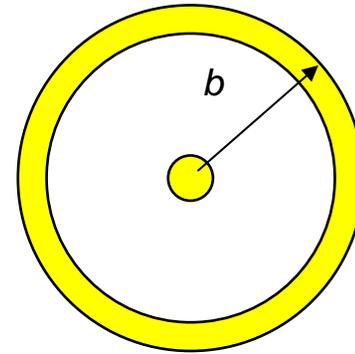
## PERTE D'ÉNERGIE MOYENNE $dE/dx$ (idée du calcul)

- Energie transférée à l'électron ( $p^2/2m_e$ ):  $E_e(b) = \Delta E = \frac{2z^2 e^4}{m_e c^2 (4\pi\epsilon_0)^2 \beta^2} \frac{1}{b^2}$

- **Integration sur le paramètre d'impact  $b$ :**

avec le nombre d'électrons:  $dn/db =$

$$2\pi b \times (nb \text{ el/surf}) = 2\pi b \times N_{AV}(Z/A)\rho\Delta x$$



- **On obtient:**

$$\begin{aligned} \overline{\Delta E} &= \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} db \frac{dn}{db} E_e(b) = 2C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz^2}{A} \rho\Delta x [\ln b]_{b_{\min}}^{b_{\max}} \\ &= C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz^2}{A} \rho\Delta x [\ln E]_{E_{\min}}^{E_{\max}} \end{aligned}$$

with  $C = 2\pi N_A \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \right)^2$

**Limites sur b (ou E)**

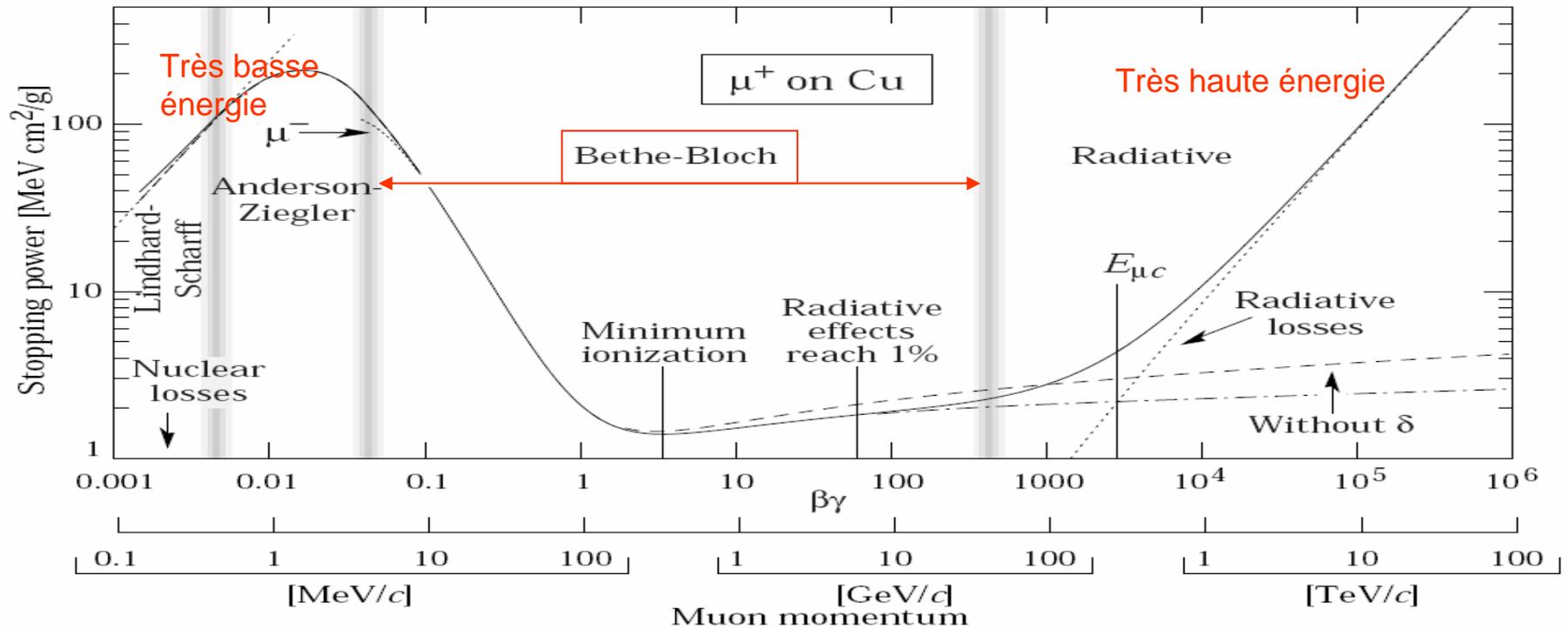
$$E_{Max} = 2\gamma^2 \beta^2 m_e c^2 \text{ (choc frontal)}$$

$$E_{Min} = I_0 \text{ (potentiel d'ionisation)}$$

# FORMULE DE BETHE(-BLOCH) (calcul quantique)

$$\frac{\overline{\Delta E}}{\Delta x} = 2C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz^2}{A} \rho \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2\gamma^2 \beta^2 m_e c^2 E_{\max}}{I_0^2} \right) - \beta^2 - \frac{\epsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right]$$

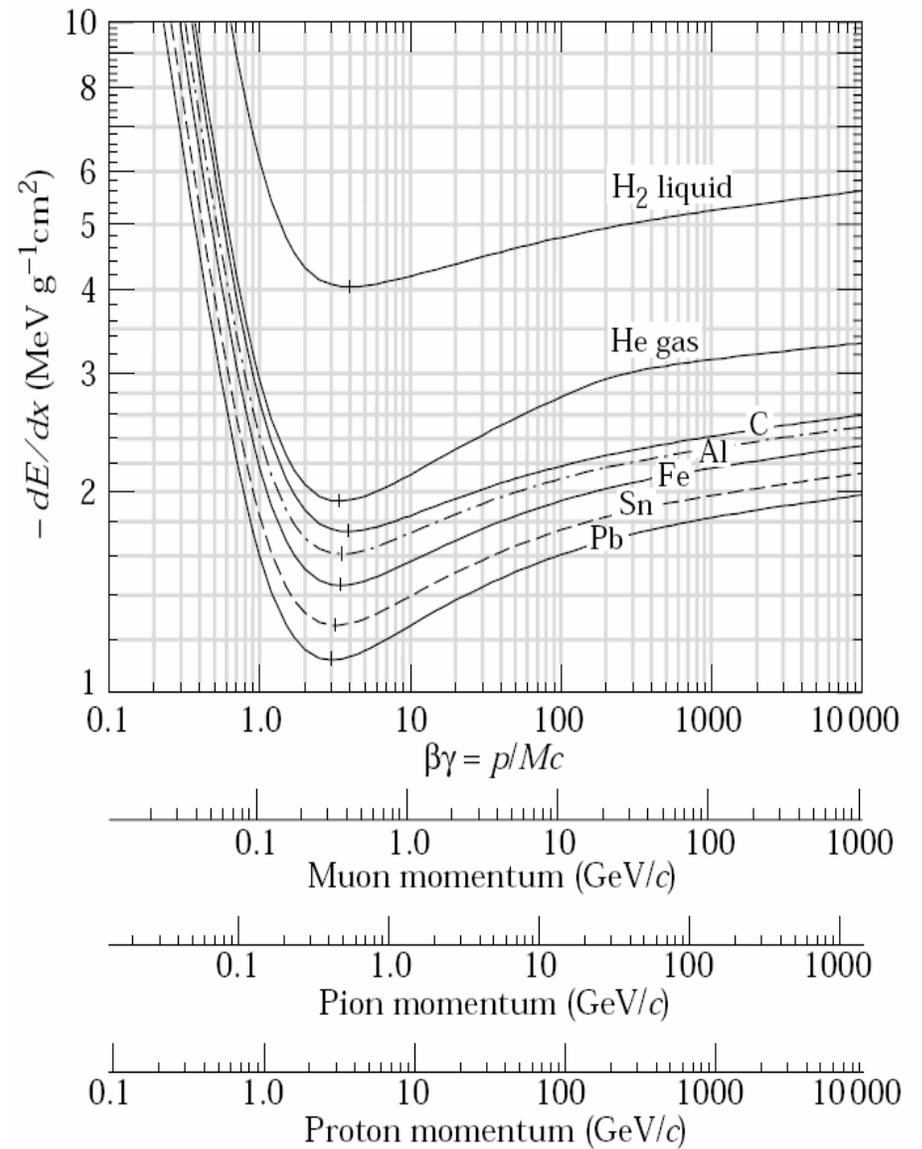
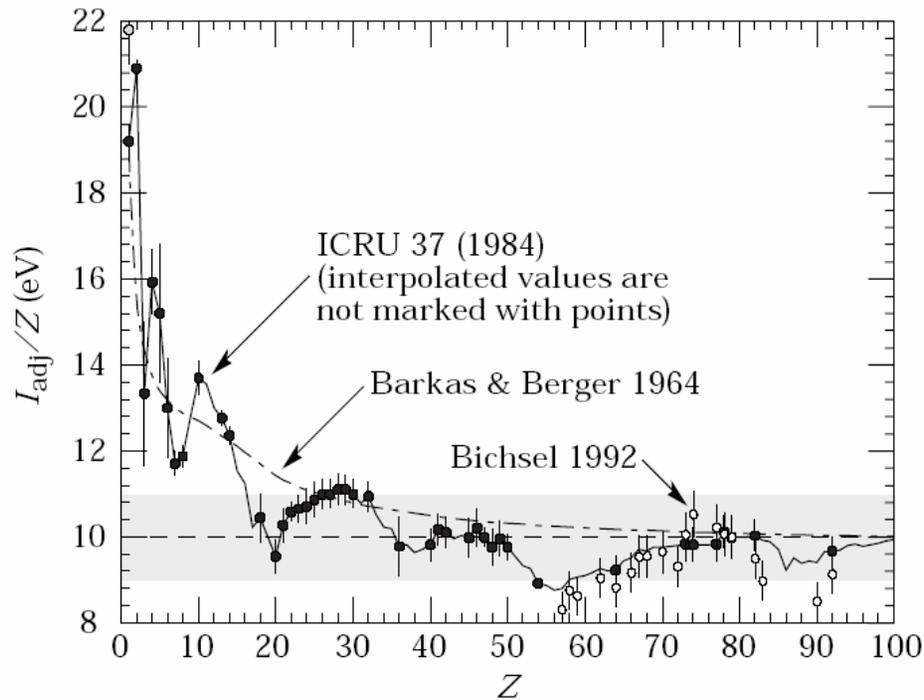
- Proportionnel à  $z^2$  de la particule et à la densité d'électrons
- Ne dépend pas de la masse de la particule (seulement  $\beta$  et  $\gamma$ )
- $\sim 1/\beta^2$  à basse énergie
- Remontée relativiste et effet densité à haute énergie



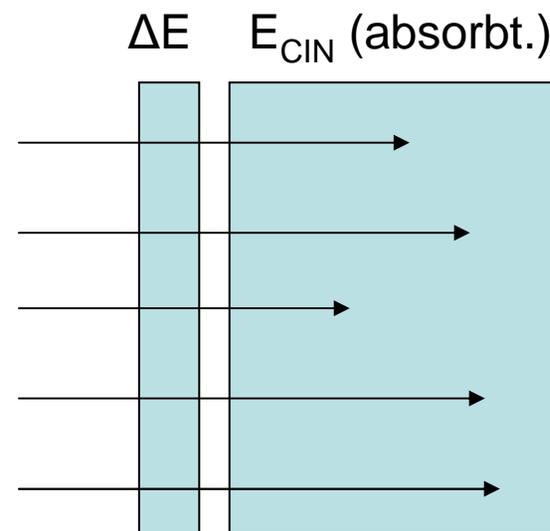
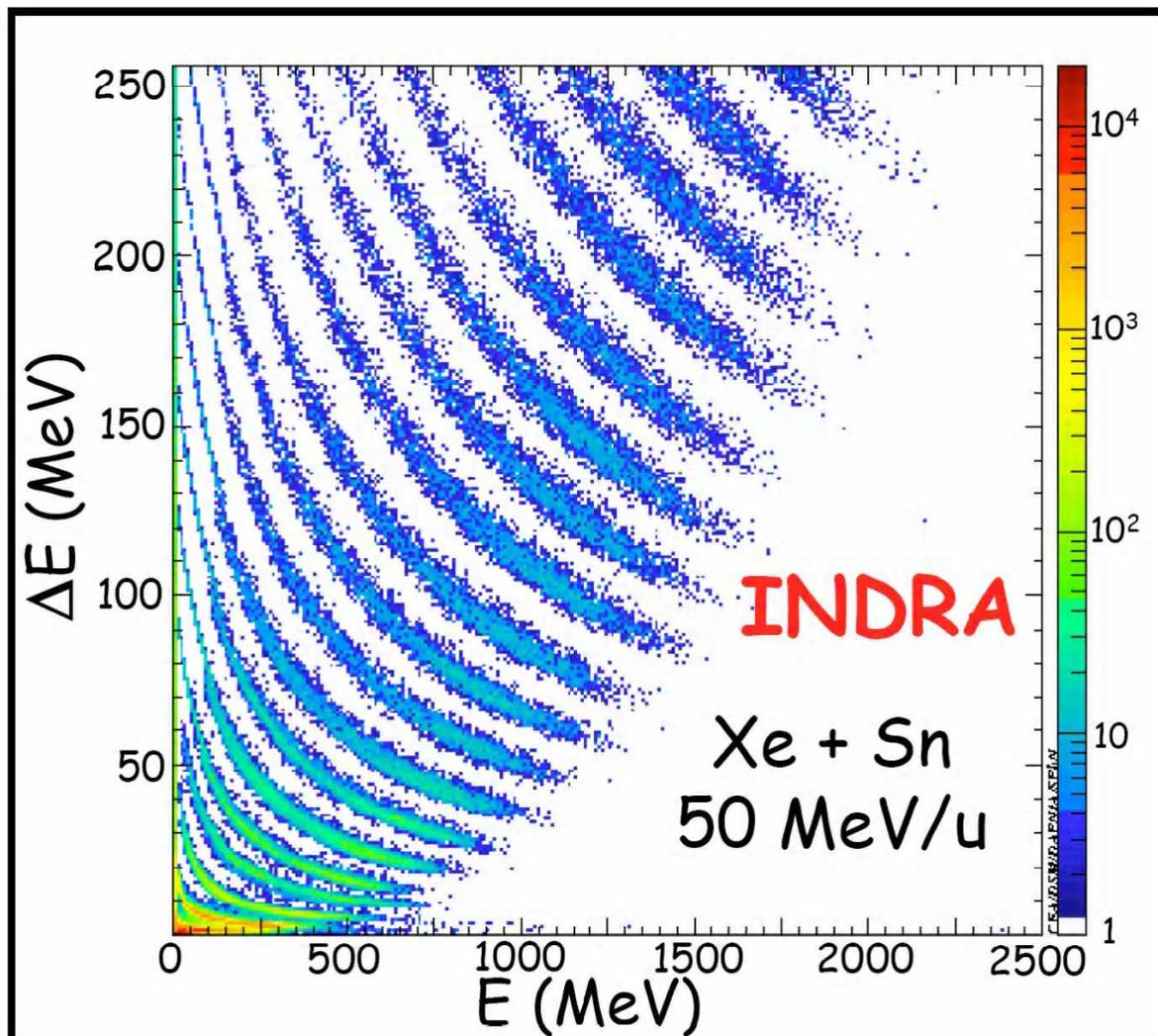
Unités pour  $\rho \times dE/dx$  : [MeV/(g/cm<sup>2</sup>)]

$dE/dx$ : Peu d'effets de la structure atomique

Pot. Ionisation:  $I_0 \sim Z \times 10 \text{ eV}$



A basse énergie, identification par  $\Delta E$  vs  $E$   
 (ici produits de fragmentation de noyaux au GSI)



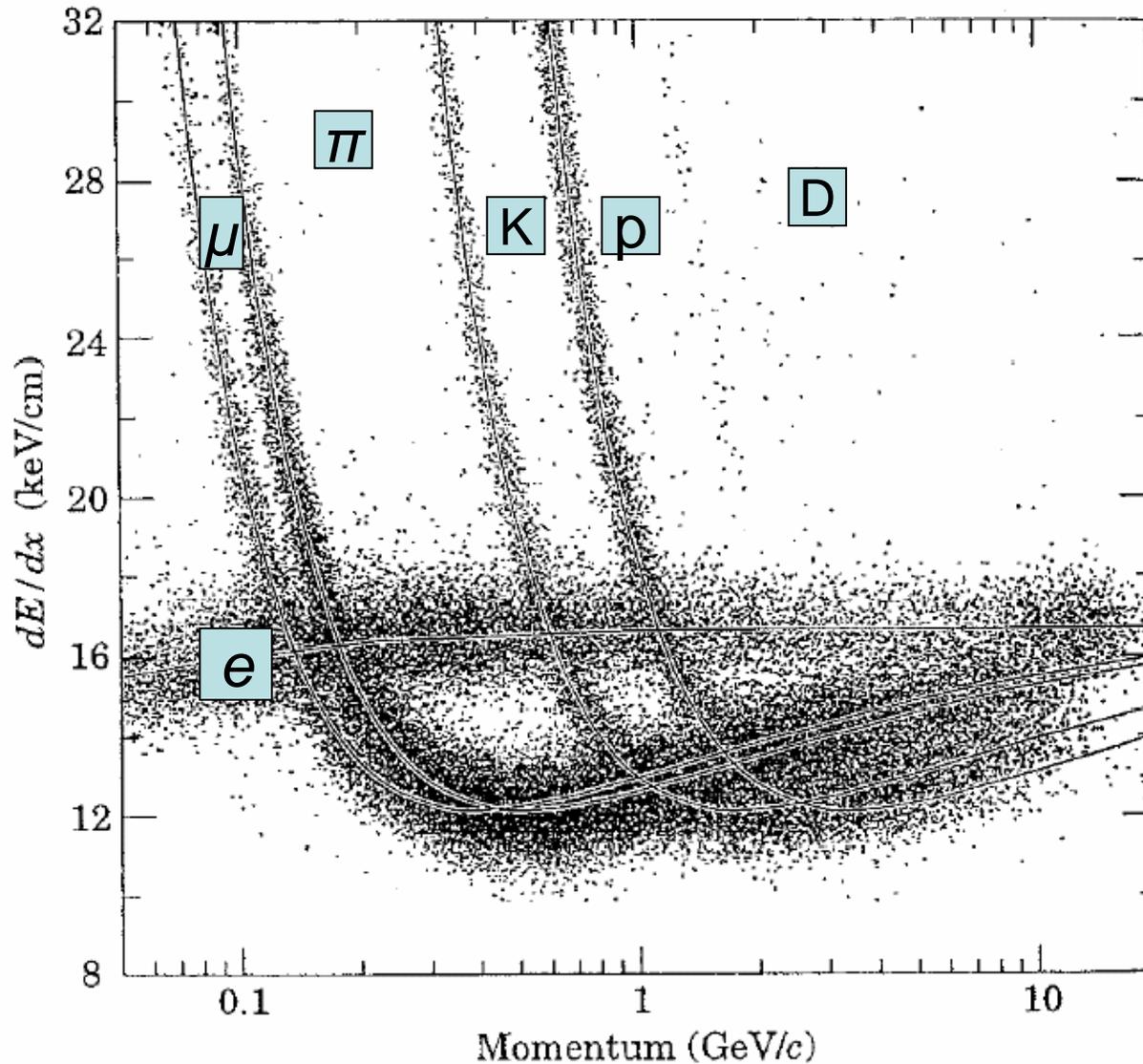
$$E_{\text{CIN}} \sim Mv^2$$

$$\Delta E \sim z^2/v^2$$

→ Hyperboles

$$E_{\text{CIN}} \times \Delta E \rightarrow z^2 \times M$$

A basse énergie, identification par  $dE/dx$  vs  $p$  (impulsion)



Mesure de  $|\mathbf{p}|$  par courbure de trajectoire dans un champ magnétique:

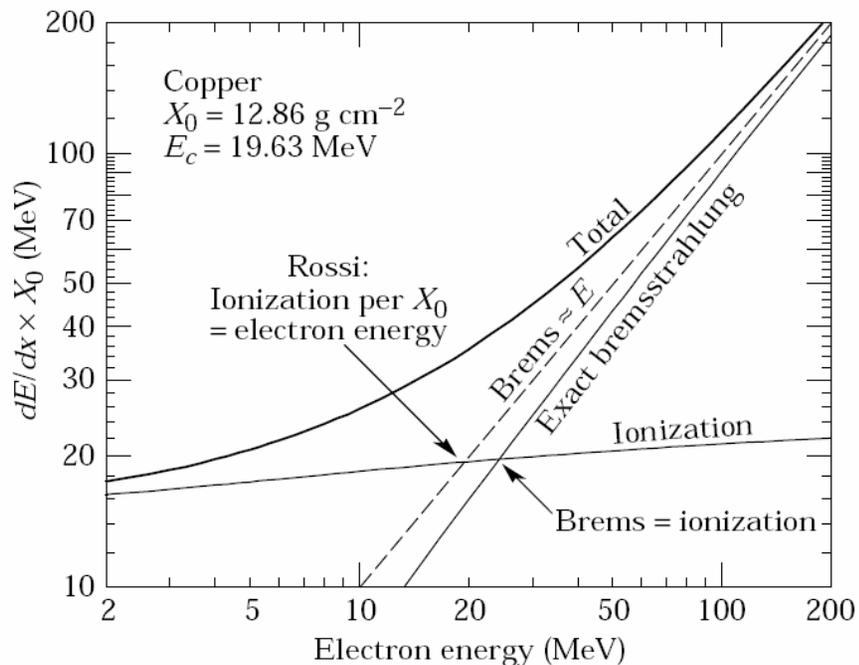
$$\mathbf{F} = d\mathbf{P}/dt = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Courbure:

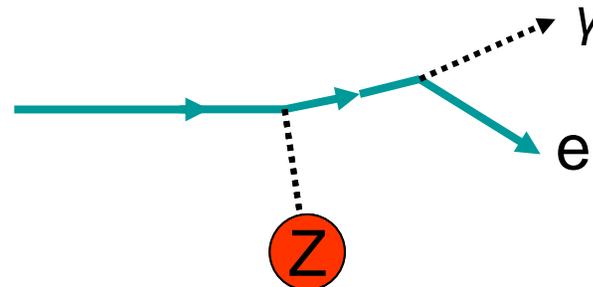
$$1/\rho = qB/p$$

## Cas particulier des électrons

- Pour l'**ionisation**, la formule B-B est modifiée pour tenir compte du principe de Pauli et de l'identité des masses.
- A cause de leur faible masse, les  $e^\pm$  font aussi de la **bremsstrahlung** (émission de photons X ou  $\gamma$ ) en plus de l'ionisation.
- $(dE/dx)_{\text{Rad}} \approx E/X_0$ .  $X_0$  est la **longueur de radiation**.
- $X_0^{-1} \sim Z(Z+1)(N_{\text{Av}} \rho/A) \ln(183 Z^{-1/3})$
- À l'**énergie critique**,  $(dE/dx)_{\text{Rad}} \approx (dE/dx)_{\text{Ion}}$ .  $E_{\text{Crit}} \approx 800 \text{ MeV} / (Z+1.2)$

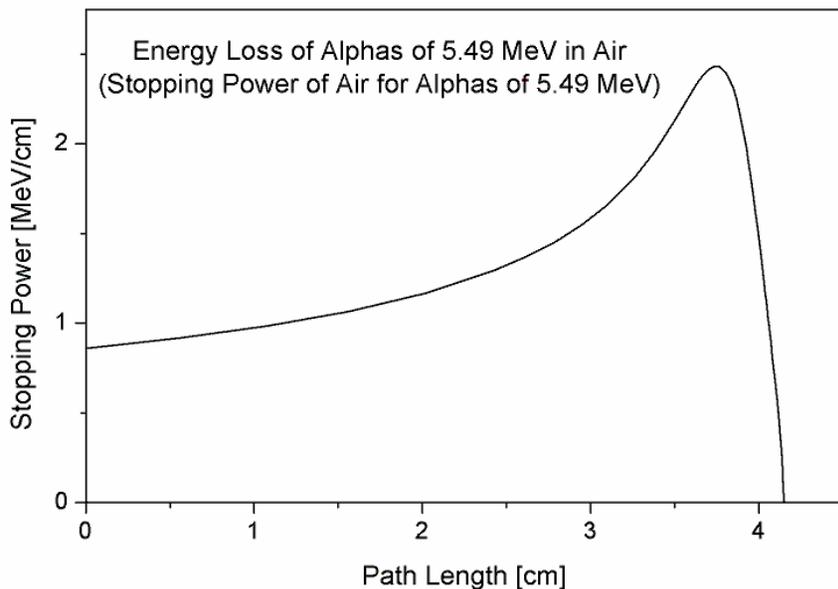


- **H2O**:  $E_{\text{Crit}} = 92 \text{ MeV}$ ,  $X_0 = 36 \text{ cm}$  ( $36 \text{ g/cm}^2$ )
- **Pb** :  $E_{\text{Crit}} = 9,5 \text{ MeV}$ ,  $X_0 = 5,6 \text{ mm}$  ( $6.4 \text{ g/cm}^2$ )

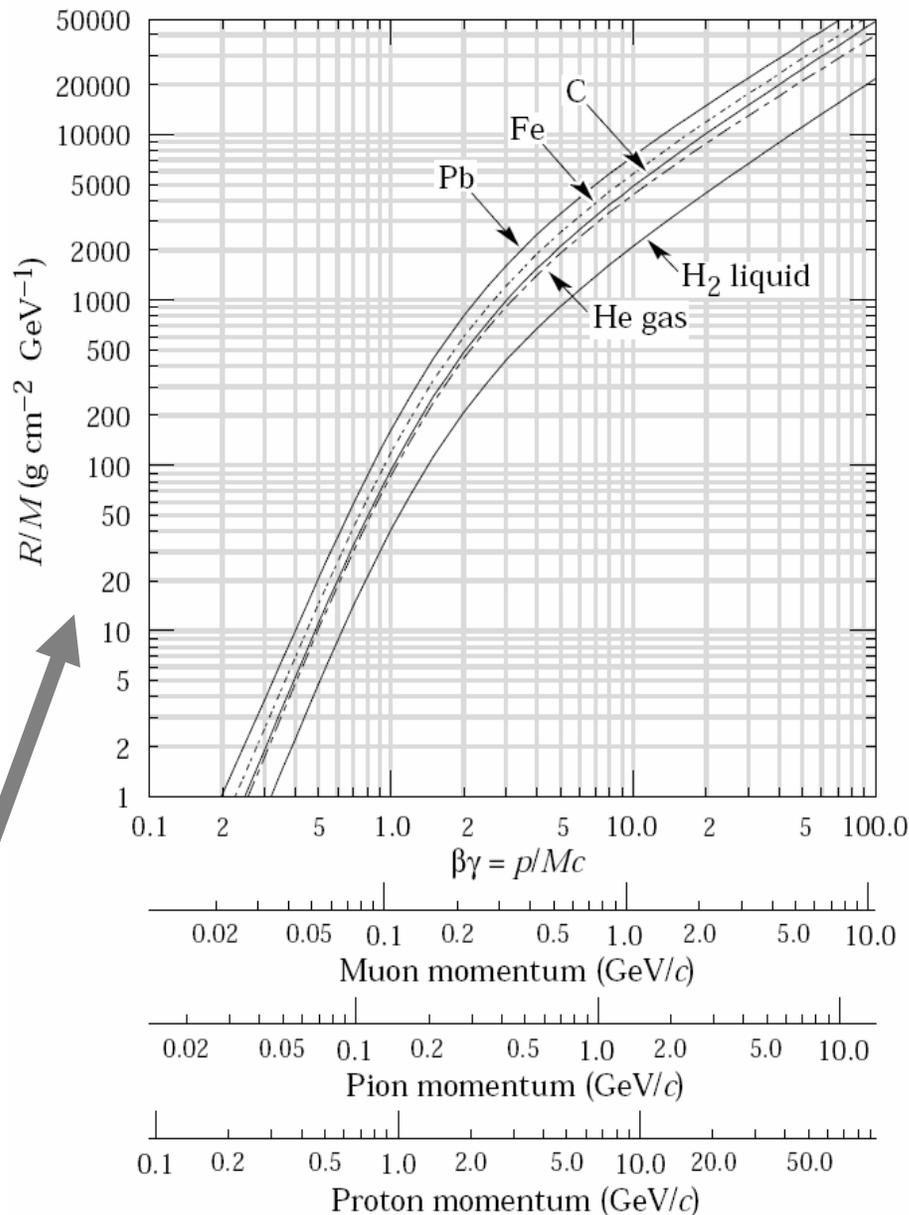


# Pénétration dans la matière, Parcours (Range)

- La perte d'énergie est plus grande en fin de parcours (pic de Bragg)
- (Pas de pic pour les électrons)



Définition du "range": 
$$R(E) = \int_0^E \frac{1}{dE/dx} dE$$



# INTERACTION DES PHOTONS (X, gamma)

Absorption:  $I=I_0 e^{-\mu x}$

- Effet photo-électrique:  $\sim Z^5$



- Effet Compton:  $\sim Z$

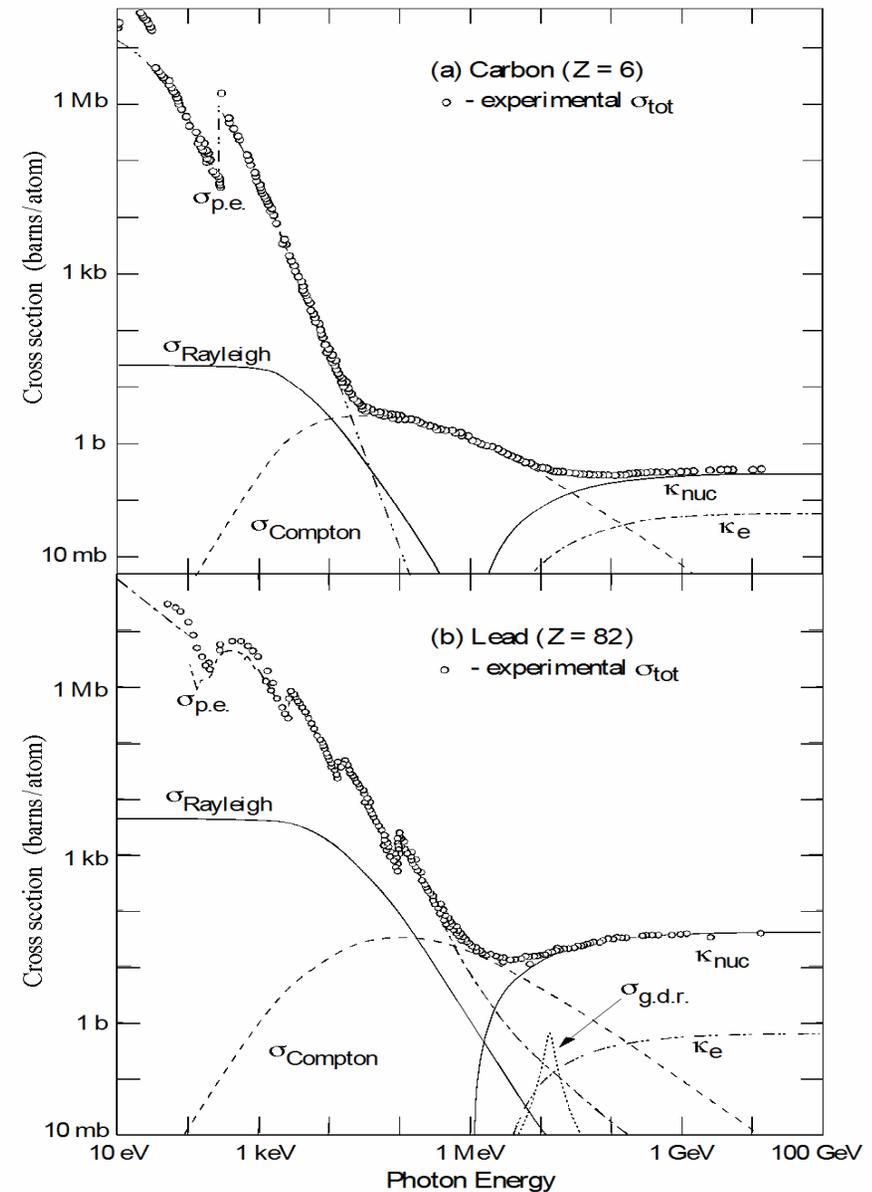
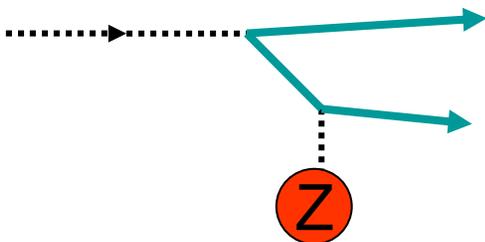


- Création de paires  $\sim Z^2$



En présence d'un spectateur  
(conservation de  $p$ ) et  $h\nu > 2m_e$

$$\sigma \approx (7/9) X_0^{-1} (A/N_{Av})$$



# GERBES ELECTROMAGNETIQUES

(Photons ou  $e^\pm$  de haute énergie)

- Cascade de Bremsstrahlung et de création de paires (longueur typique:  $X_0$ )

## Modèle simple

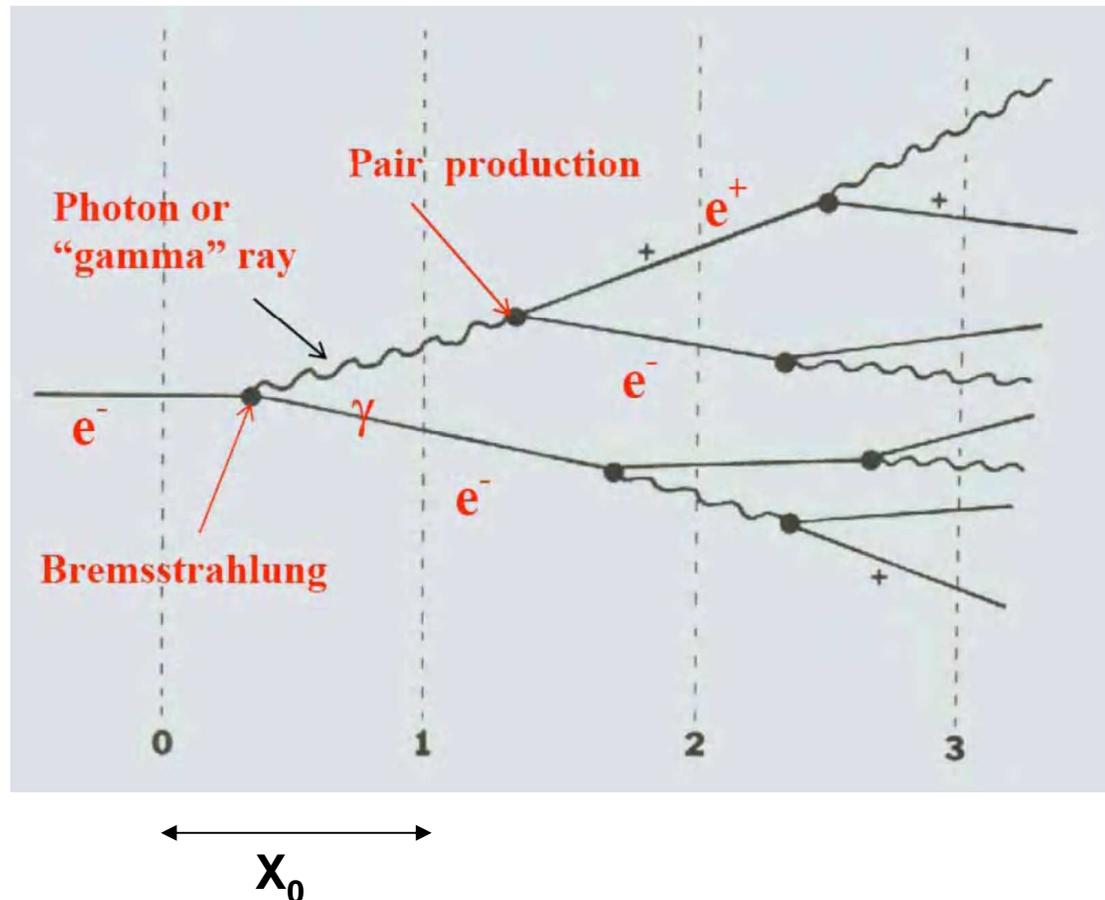
- Le nombre de particules double à chaque  $X_0$  traversée et l'énergie se répartit entre les particules.

- Le processus s'arrête à l'énergie critique  $E_C$  (plus de bremsstrahlung).

- La profondeur est alors:

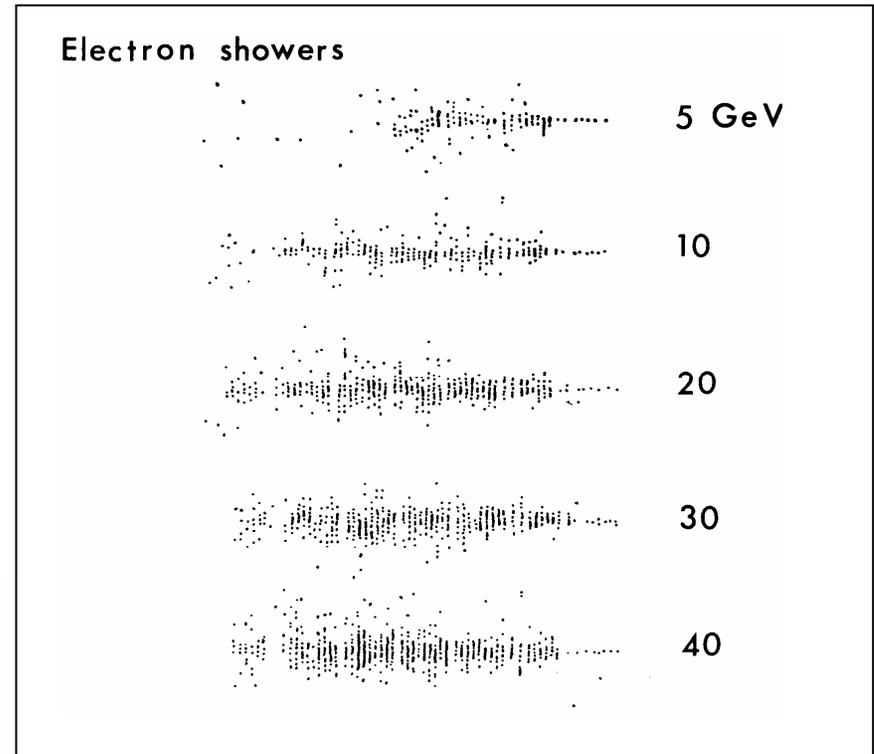
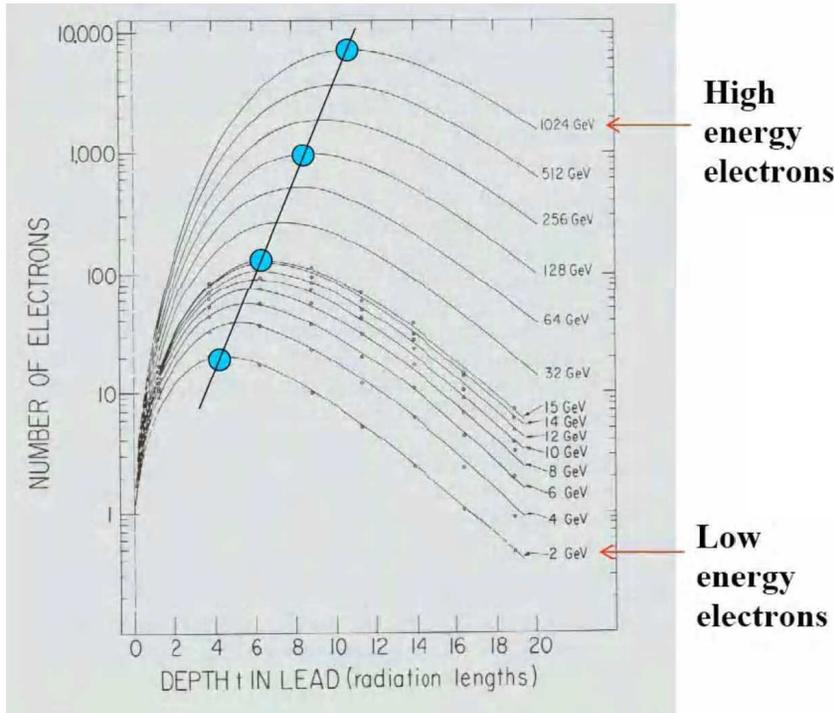
$$t_{\text{MAX}} = \ln(E_0/E_C)/\ln(2)$$

(en unités de  $X_0$ )



# GERBES ELECTROMAGNETIQUES (suite)

## Longitudinal Shower Profile



Shower maximum changes **logarithmically** with energy

Maximum of shower

$$t(X_0) = \ln\left(\frac{E}{\varepsilon}\right) - 1.1 \quad \text{for } e$$

$$t(X_0) = \ln\left(\frac{E}{\varepsilon}\right) - 0.3 \quad \text{for } \gamma$$

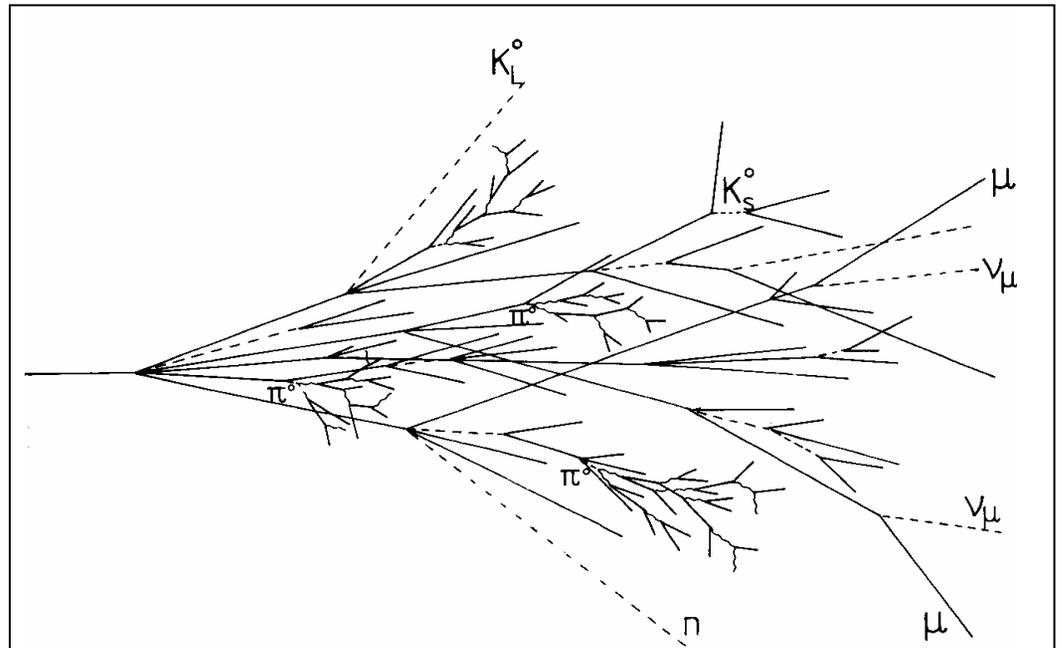
The **lateral** spread of the shower is mainly governed by the multiple scattering of the electrons (Moliere radius  $R_M$ ).

95 % of the shower is contained inside a cone of size  $2R_M$

$$R_M = 21 \text{ MeV} \times (X_0/E_{\text{crit}}) \quad (\sim A/Z \text{ [g/cm}^2\text{)})$$

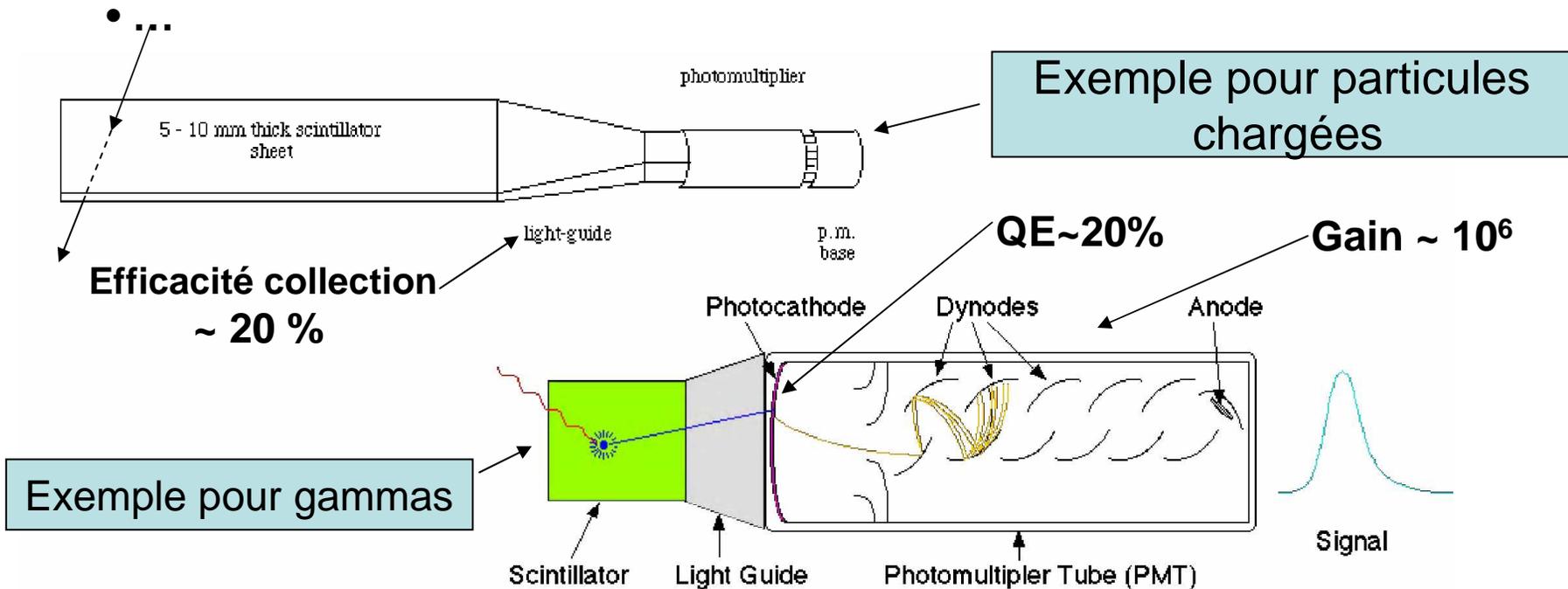
# INTERACTIONS HADRONIQUES (nucléaires)

- En plus d'être ralentis (si ils sont chargés), les hadrons peuvent entrer en collision avec les noyaux et provoquer des réactions inélastiques, (excitation ou fragmentation du noyau, production d'autres particules)
- (A l'arrêt, désintégration si + ou atome exotique et capture si -)
- A haute énergie la section efficace inélastique vaut:  $\sigma_I \approx 40 \text{ mb} \times A^{0,71}$  ( $\sim A^{2/3}$ )
- La longueur d'interaction vaut:  $\lambda_I = A/(N_{Av} \rho \sigma_I)$  (C:  $\rho\lambda_I=86 \text{ g/cm}^2$ , Pb:  $\rho\lambda_I=194 \text{ g/cm}^2$ )
- De par la variété des processus possibles, les gerbes hadroniques fluctuent beaucoup.
- La résolution d'une mesure d'énergie (par calorimètre) est moins bonne que pour les gerbes électromagnétiques.
- Les  $\mu^\pm$  n'ont pas d'interaction hadroniques.



# DETECTEURS A SCINTILLATION (fluorescence)

- Désexcitation par émission de lumière à la suite d'une ionisation.  
Détection de lumière par Photomultiplicateur, Photo-diode, Galette de micro-canaux
- Scintillateurs organiques (plastiques ou liquides):  $\tau \approx 1 \text{ nsec}$ ,  $1 \text{ ph}/100 \text{ eV}$
- Scintillateurs inorganiques (cristaux,  $Z \gg 1$ , détection gamma ou gerbes el.mag.)
  - **NaI(Tl)**  $X_0: 2.6 \text{ cm}$ ,  $\tau \approx 230 \text{ nsec}$ ,  $1 \text{ ph}/25 \text{ eV}$
  - **BGO**  $X_0: 1.1 \text{ cm}$ ,  $\tau \approx 300 \text{ nsec}$ ,  $1 \text{ ph}/225 \text{ eV}$

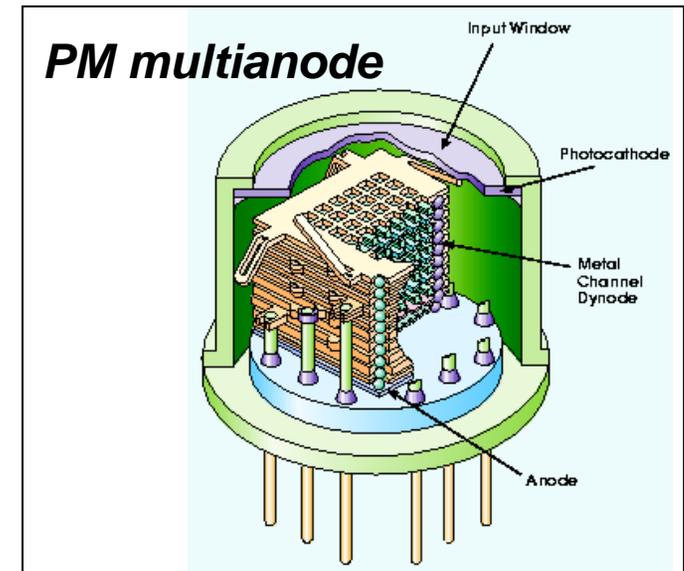
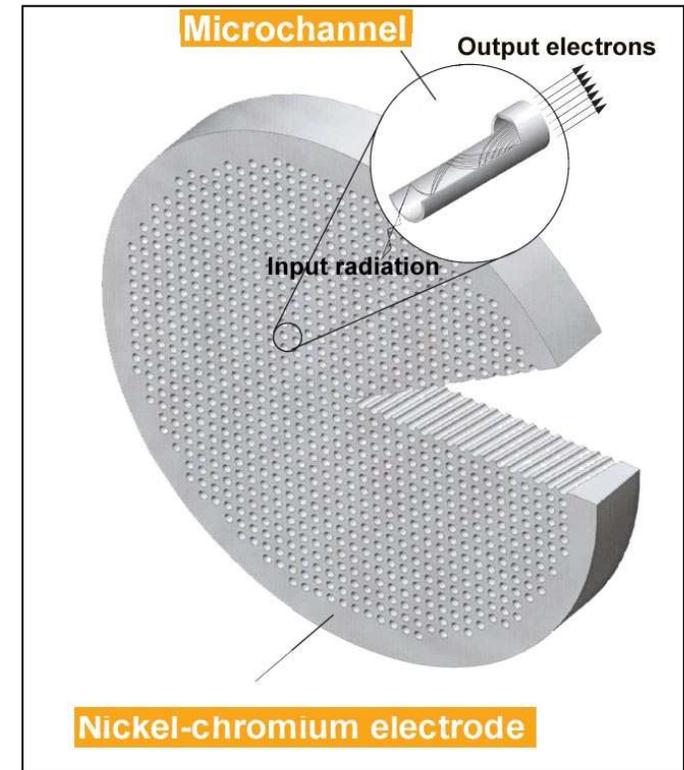
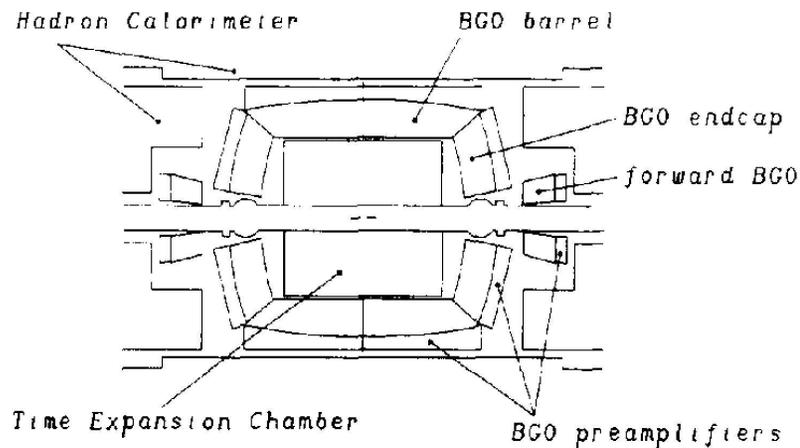
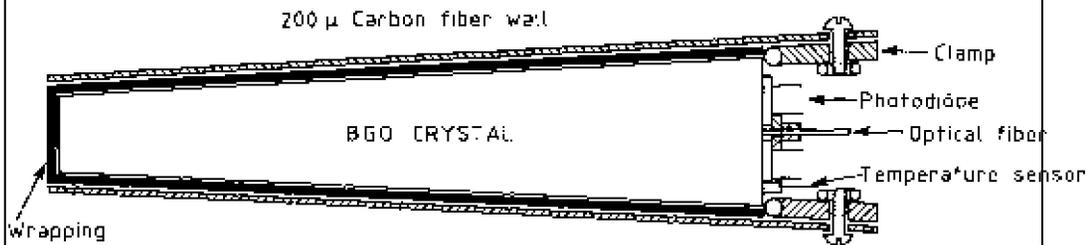


# DETECTION DE LA SCINTILLATION

(exemples)

## Calorimètre électromagnétique de L3-LEP

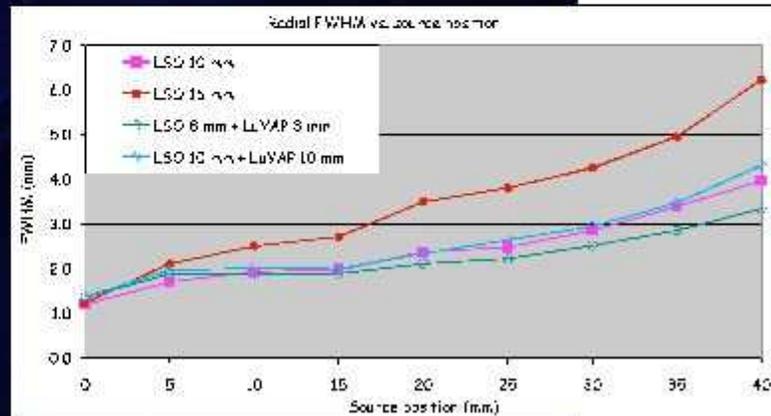
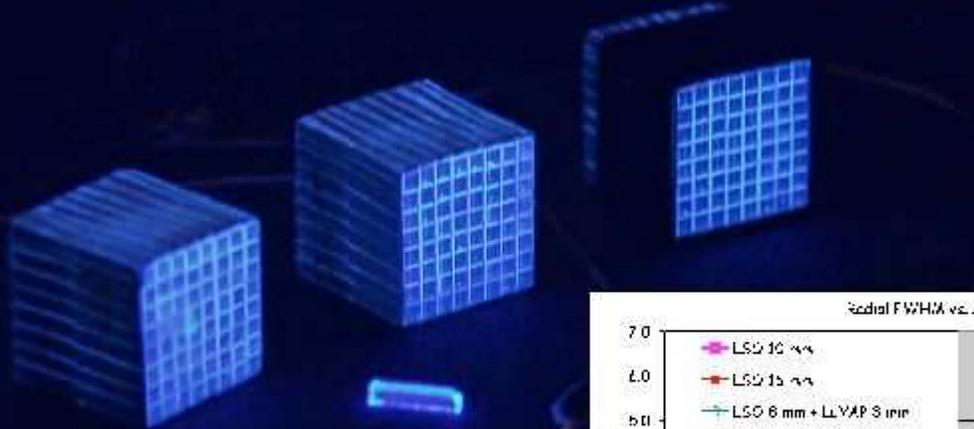
- 12000 cristaux de BGO de 24 cm ( $\sim 22 X_0$ )
- $R_M = 2,4$  cm
- Lecture par **photodiode** (pas de PM)



# DETECTEURS A SCINTILLATION (segmentation)

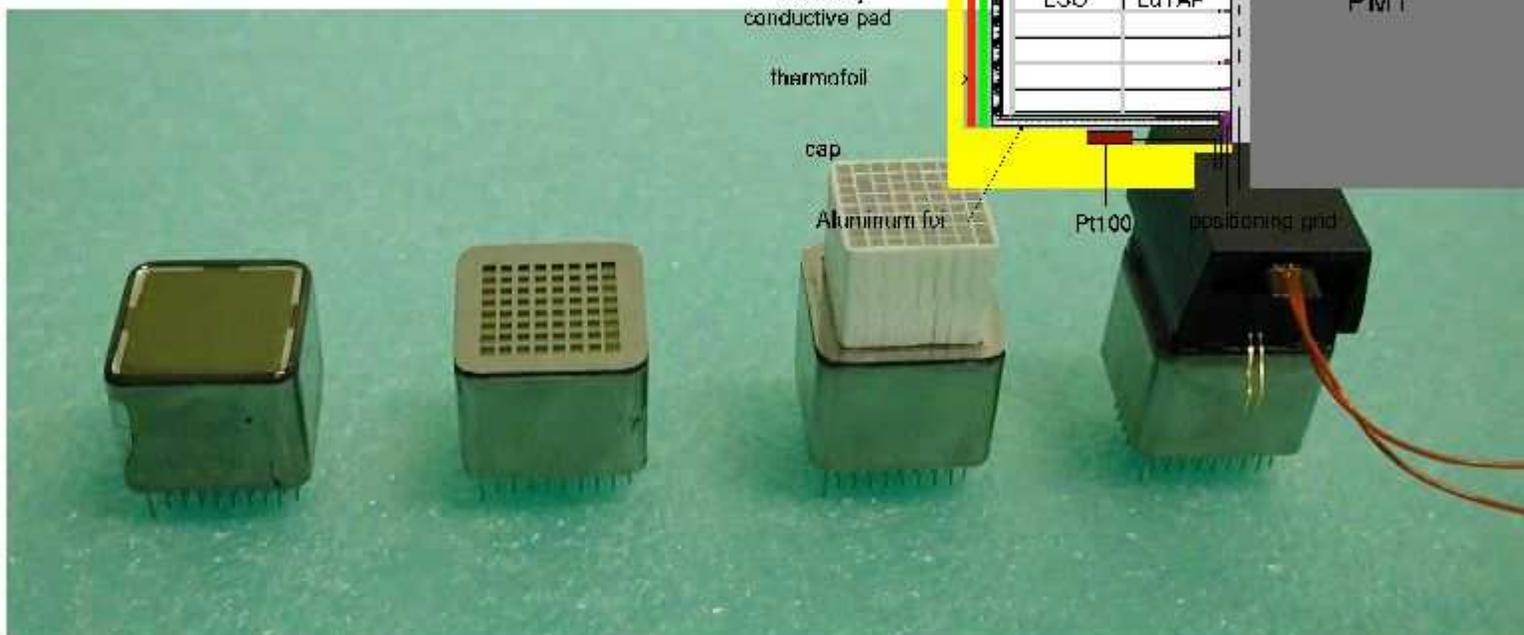
## ClearPET: High Resolution in 3D PET

High spatial resolution & High signal-to-noise ratio



# DETECTEURS A SCINTILLATION (segmentation du PM)

## Phosphor Sandwich (phoswich) detector design

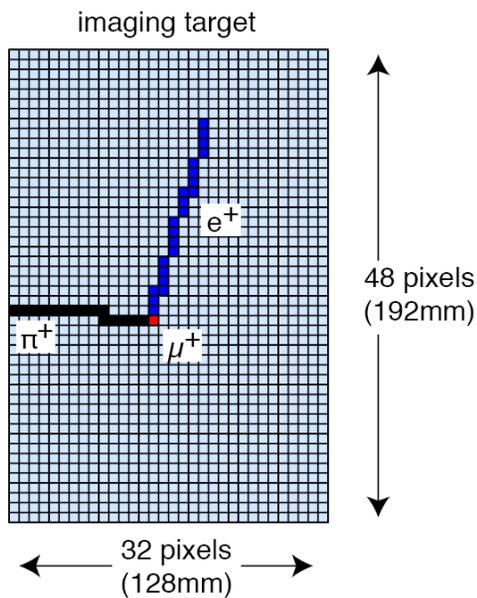
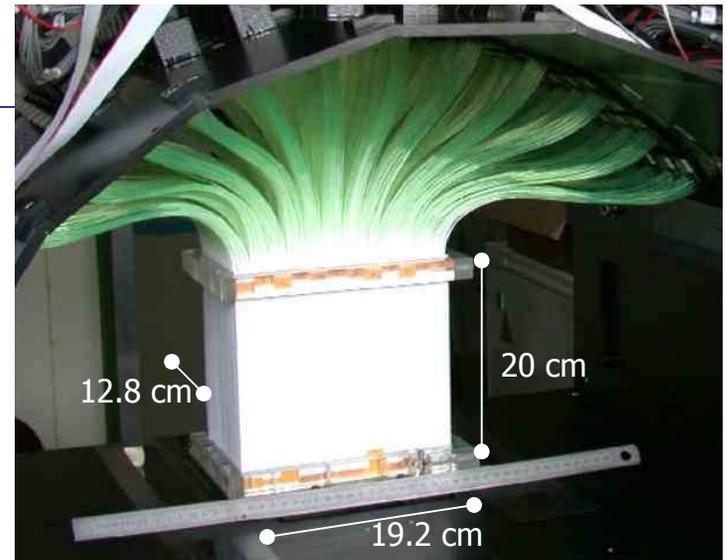


Mystères au cœur de l'Univers et de la matière



**Expérience FAST: PMs segmentés,  
guide lumière par WLSF (wave length shifter)**

- Active target :
  - stopping material for  $\pi^+/\mu^+$
  - detector for the particles
- **Solid plastic scintillator** (Bicron BC400)



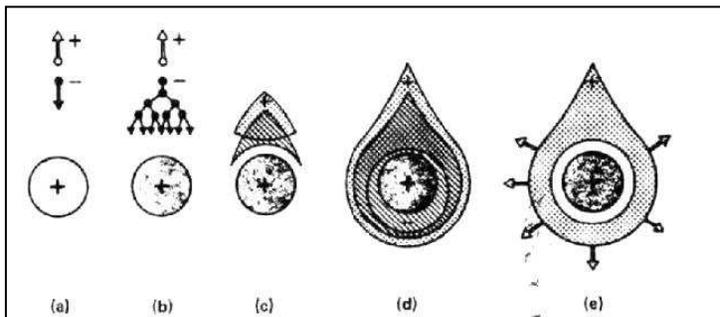
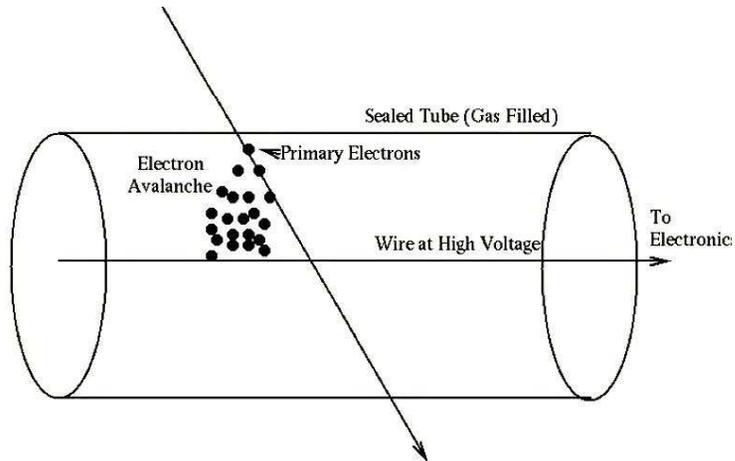
- **high granularity**
- **tracking capabilities**
- **fast imaging detector**
- **identical replicated mini-detectors**
- **vertical arrangement 32 x 48**

- **1536 pixels** (8 x 12 [4x4]-bundles)
- **1 pixel = scintillator bar (4 x 4 x 200 mm<sup>3</sup>) with 2 WLSF**

BC400 solid plastic scintillator plates - 4x4x200mm<sup>3</sup> bars - two grooves machined  
 2 WLSF (BCF-92) inserted and glued into the grooves  
 diffusive reflective paint (BC-620)  
 - bundle of 4x4 pixels [96 bundles]  
 - fibers housed in a special mask

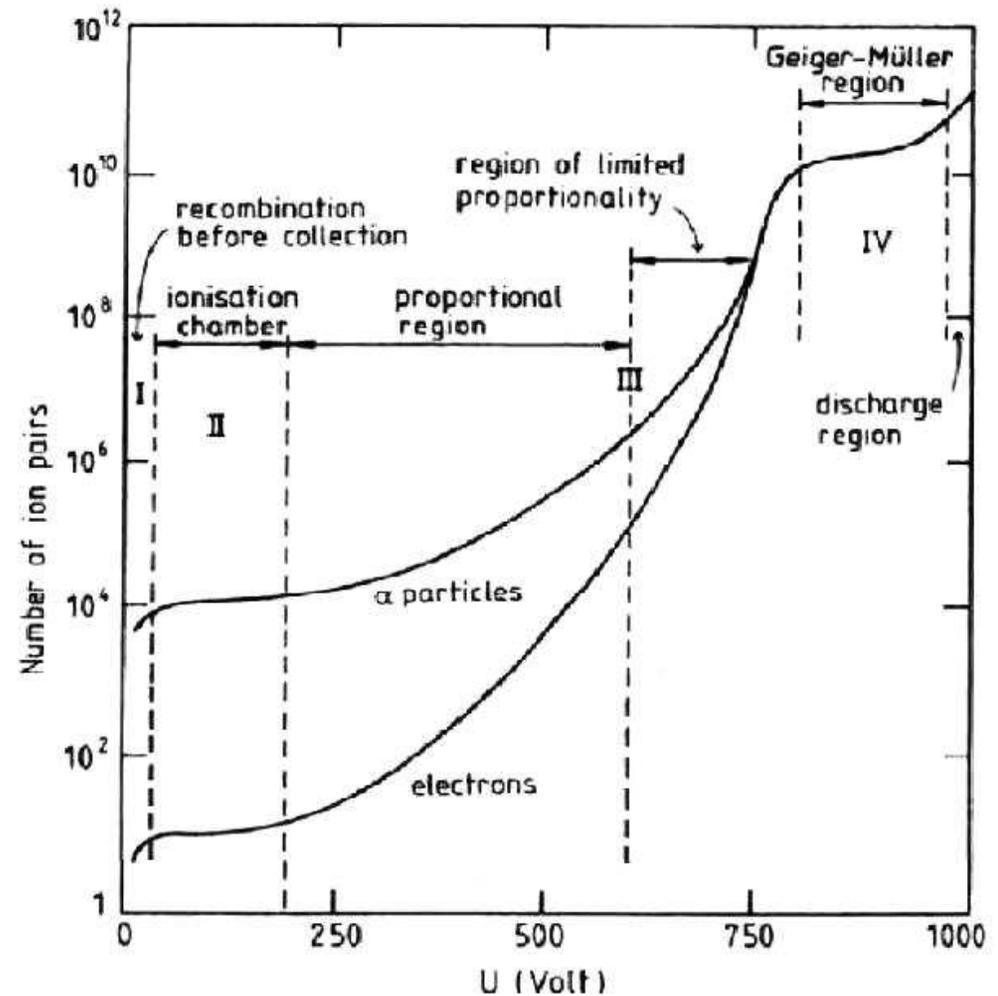


# DETECTEURS À GAZ



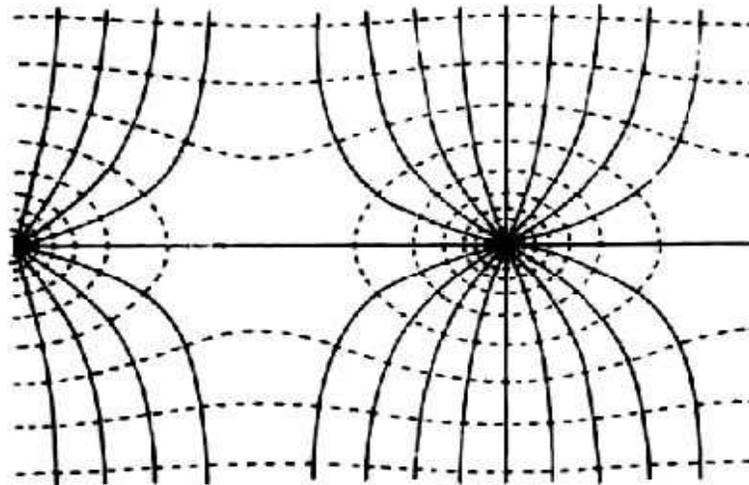
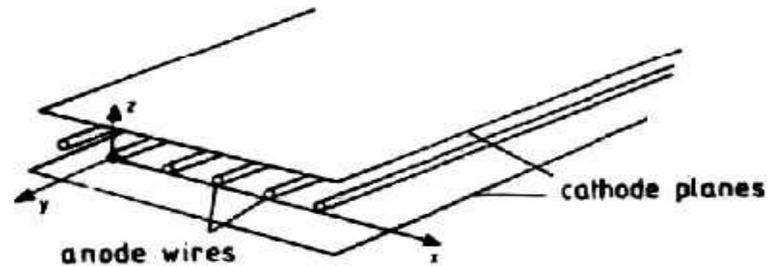
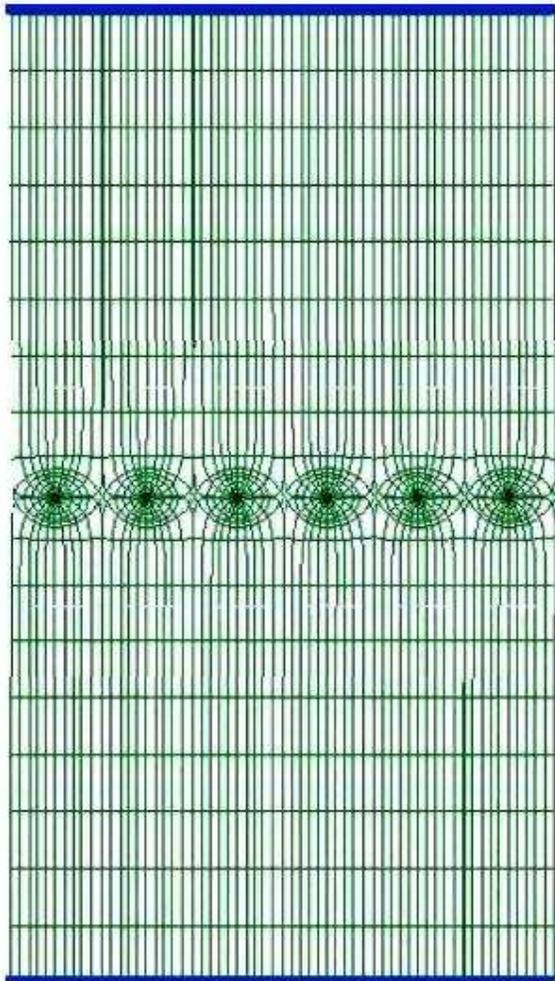
- Amplification près du fil, si le champ  $E$  est élevé.
- Gaz noble  $\rightarrow$  grand gain.
- Ajout de gaz polyatomique pour absorber les rayons X (désexcitation des ions).

Fig. 2.8. Gas amplification factor as a function of voltage applied in a proportional counter for ionizing  $\alpha$ -particles and electrons (after [PR 58]).

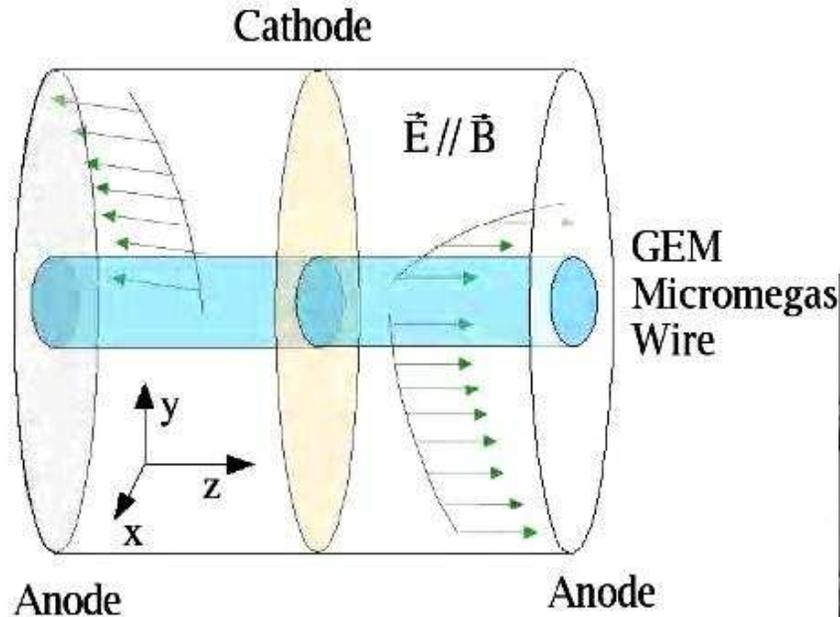


# DETECTEURS À GAZ (Charpak, 1968)

## Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)

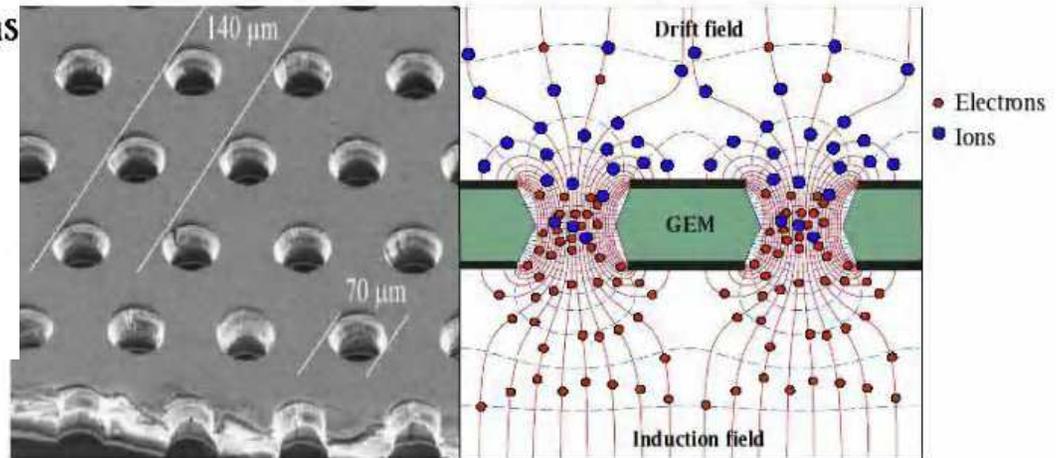


# Time Projection Chamber (DéTECTEURS à gaz)

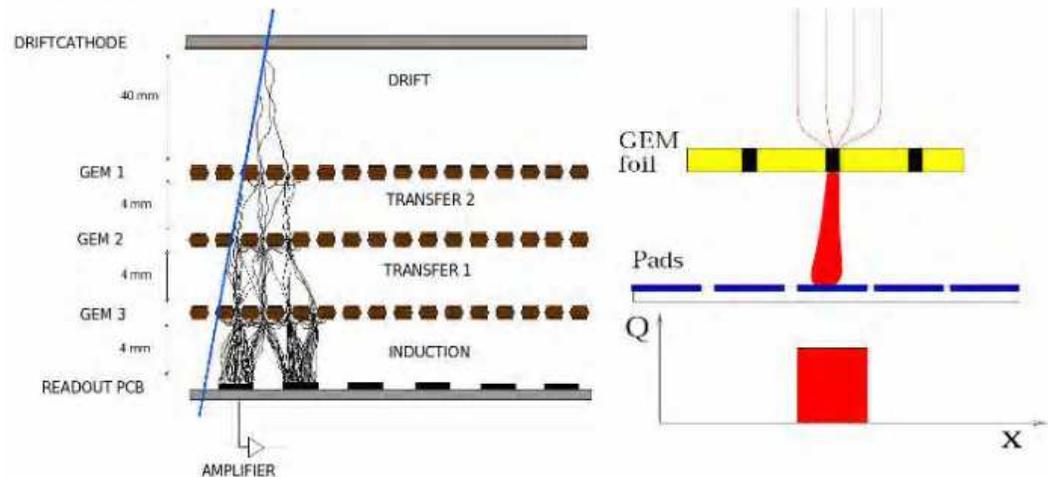


**TPC (image 3D)**

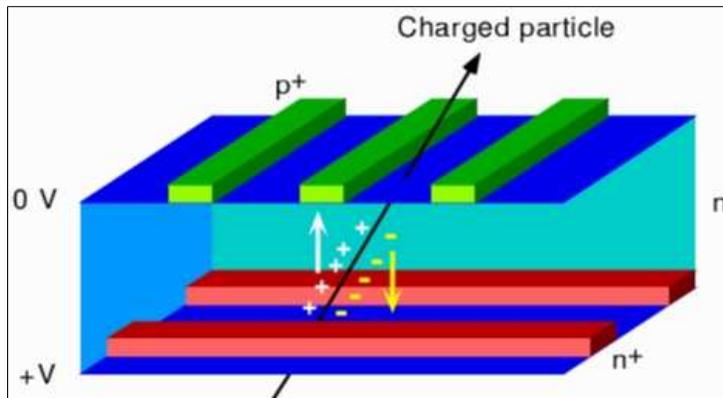
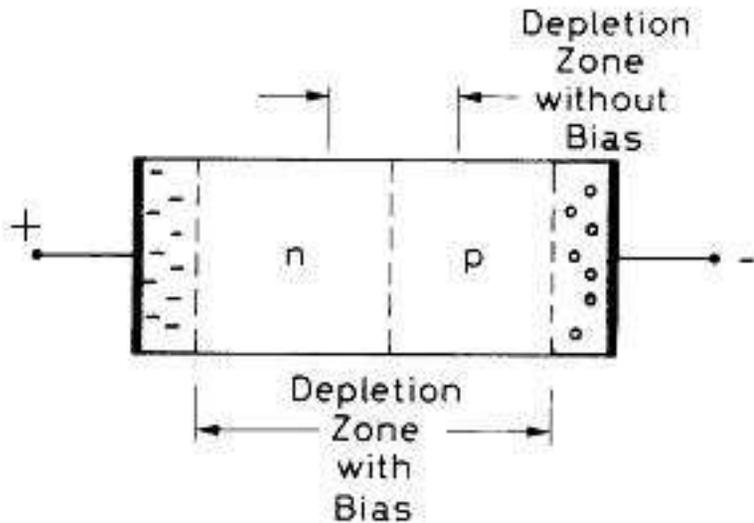
## Amplification par Gaz Electron Multiplier



- Les électrons produits sur la trajectoires dérivent le long du champ  $E // B$ .
- Ils sont collectés (et amplifiés) sur les anodes (PADs) et forment une image 2D (xy).
- Le temps de dérive donne la coordonnée Z.



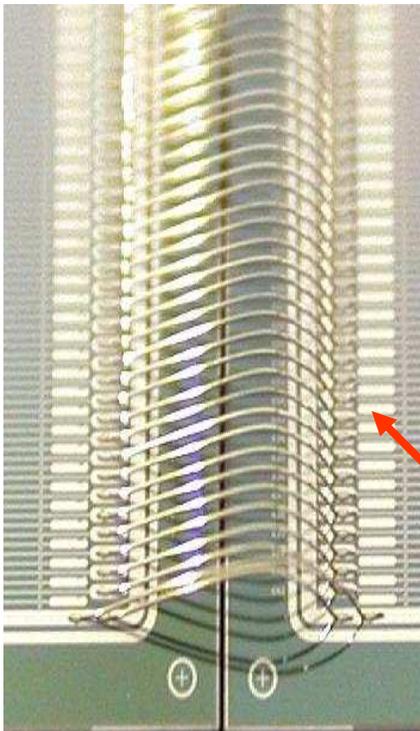
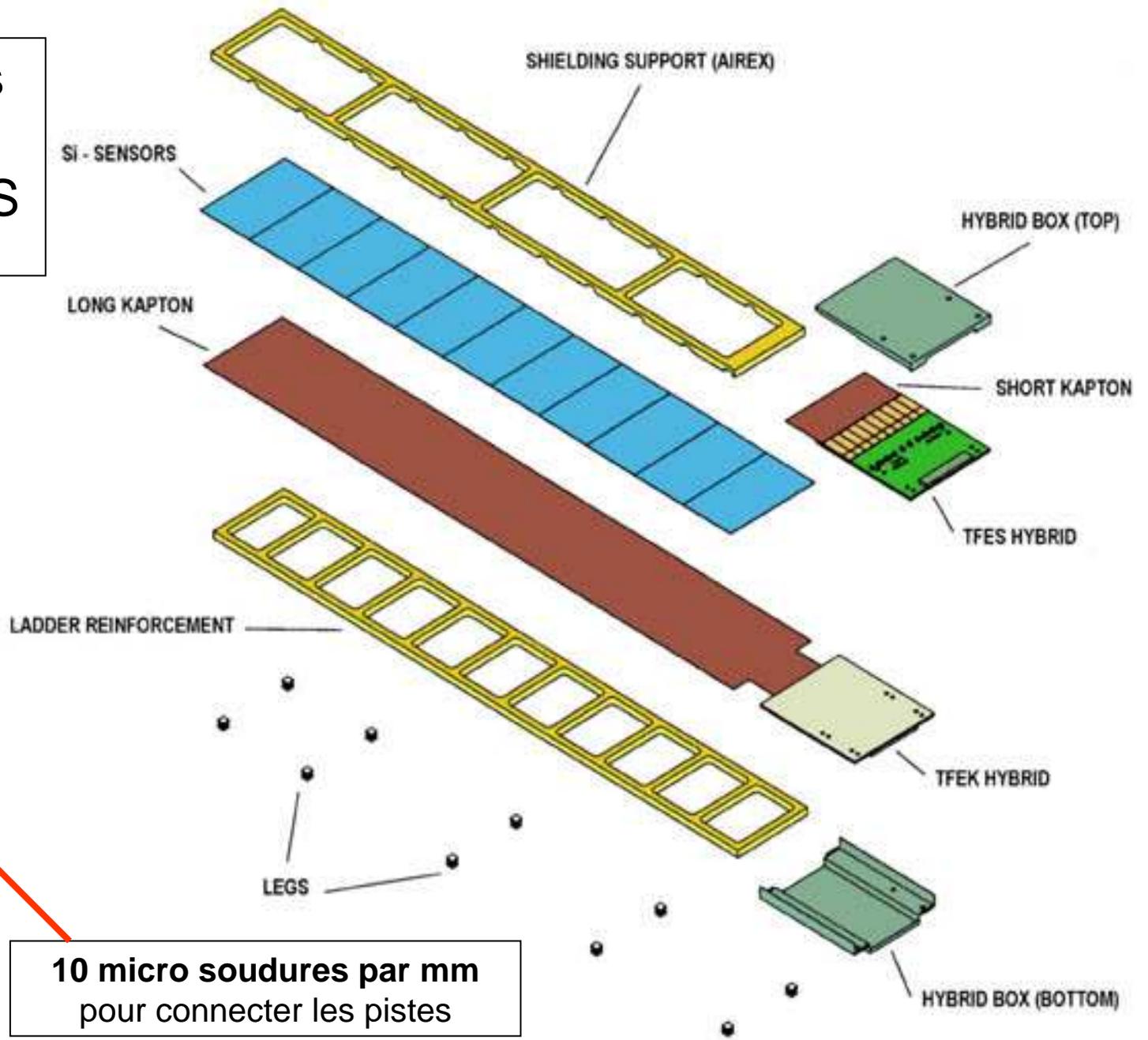
# DÉTECTEURS À SEMI-CONDUCTEURS (Si)



On utilise aussi actuellement des détecteurs à **pixels**

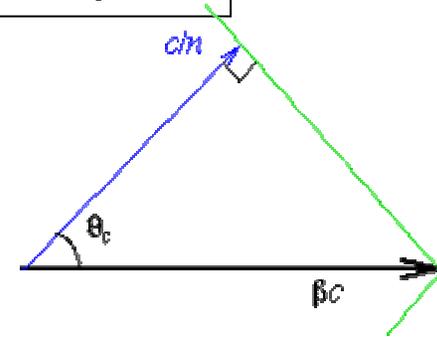
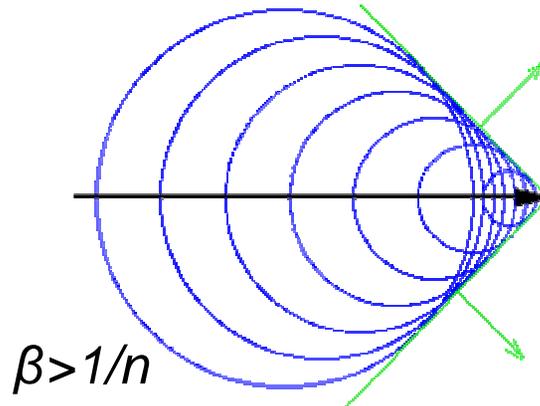
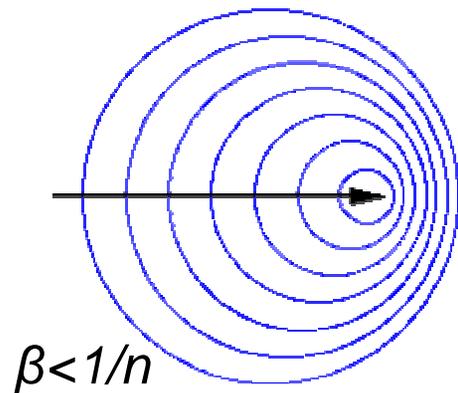
- Dans une jonction pn (diode), la zone de déplétion (isolante) peut être augmentée par une polarisation de bias inverse.
- Les charges (électrons-trous) créées par ionisation dans cette zone sont collectées sur les électrodes.
- Plaquettes de  $\sim 4 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 0,3 \text{ mm}$
- Avec les micro-pistes ( $25 \mu$ ), des résolutions spatiales de  $10 \mu\text{m}$  sont fréquentes.
- Dans le Silicium, il suffit en moyenne de  $3,6\text{eV}$  pour produire une paire. (gaz  $\sim 30$ , scint  $\sim 100$ ).  
→ **Bonne résolution de mesure  $dE/dx$**
- Dans  $300 \mu\text{m}$  de Si, l'ionisation produit  $\sim 30'000$  charges, soit  $\sim 5 \text{ fCb}$ . Il est donc nécessaire d'amplifier et de maîtriser les problèmes de bruit.

Les modules  
silicium du  
tracker d'AMS



**10 micro soudures par mm**  
pour connecter les pistes

# LES DÉTECTEURS À EFFET CHERENKOV (*Particules chargées dans un milieu transparent*)



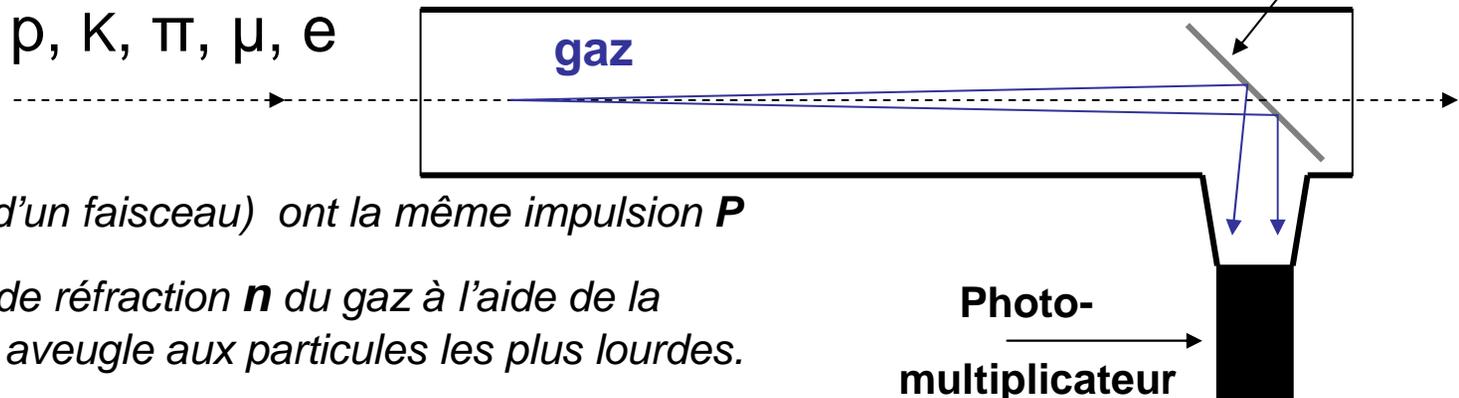
$$\cos\theta_c = 1/\beta n$$

Emission de lumière selon un cône d'angle  $\theta_c$ .

$$N_{ph} \sim \sin^2\theta_c = 1 - 1/\beta^2 n^2$$

## Compteur à seuil

$\rho, K, \pi, \mu, e$

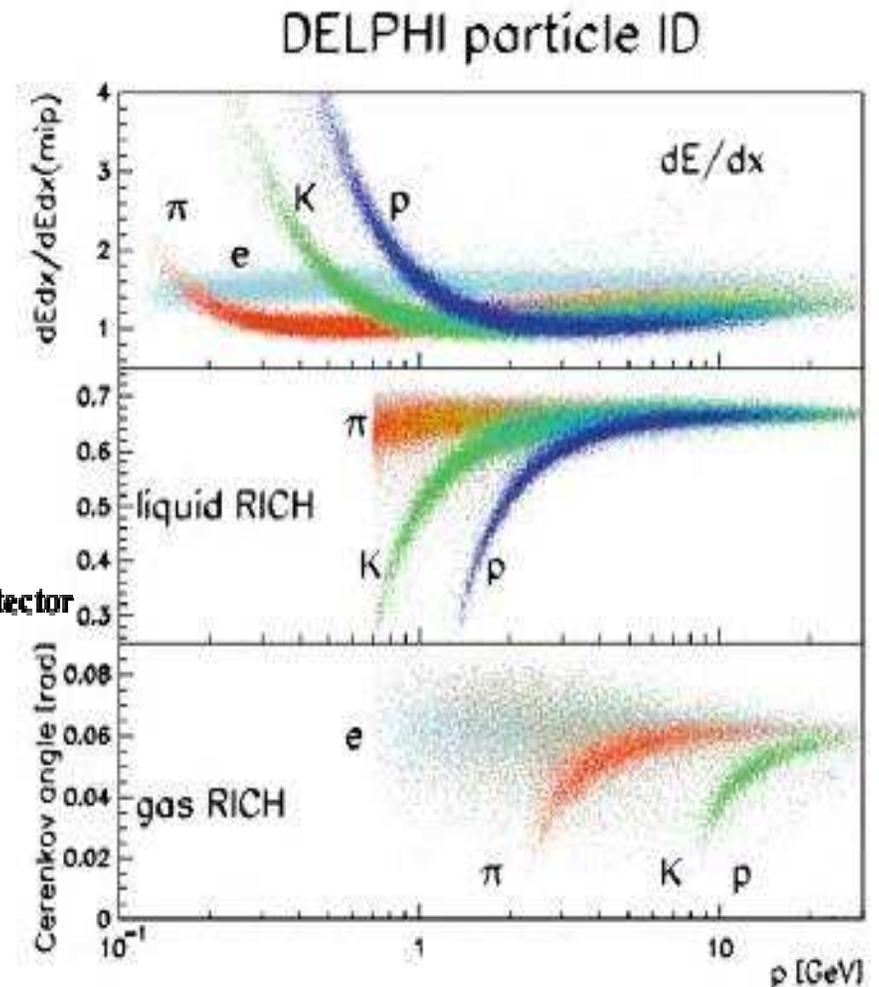
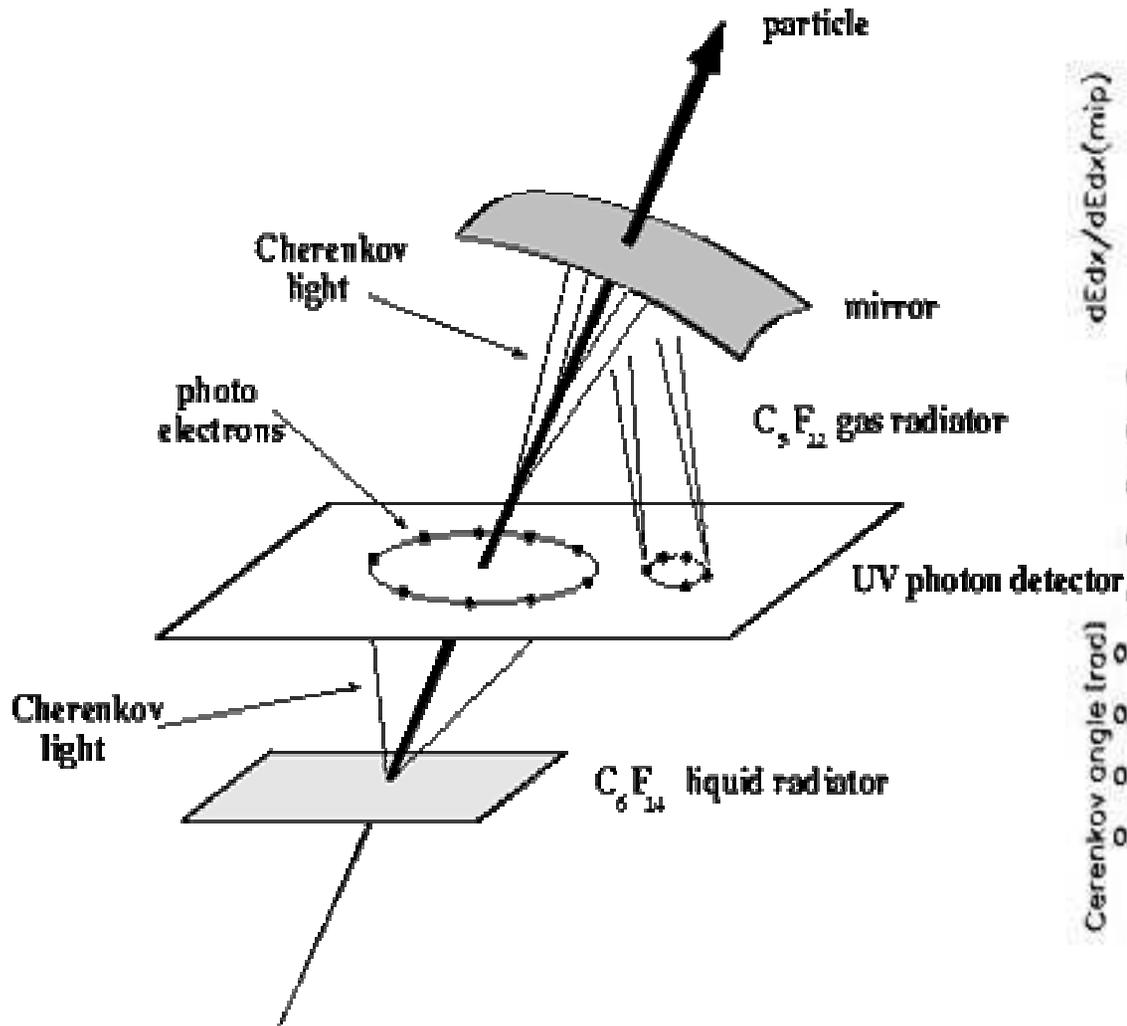


- Les *particules* (d'un faisceau) ont la même impulsion  $P$
- On règle l'indice de réfraction  $n$  du gaz à l'aide de la pression pour être aveugle aux particules les plus lourdes.

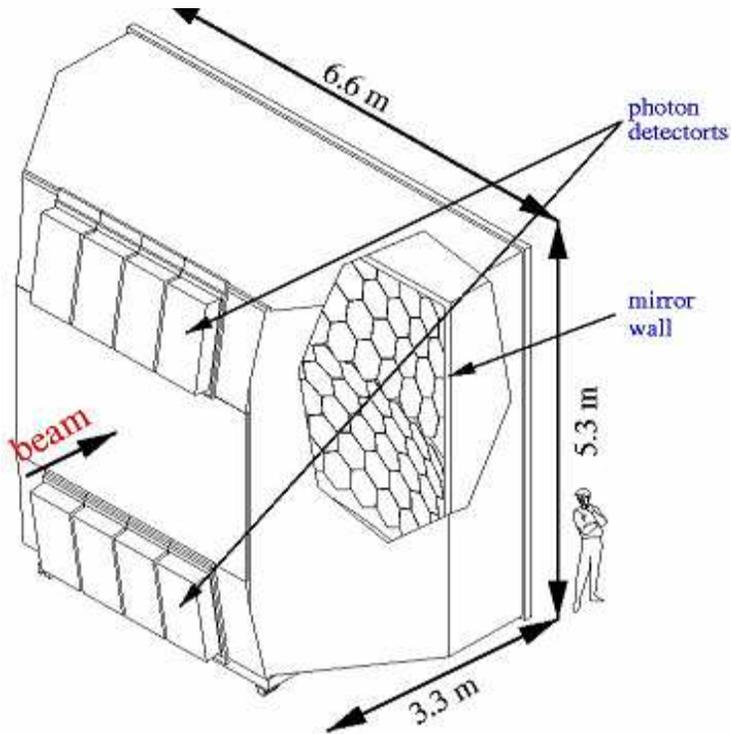
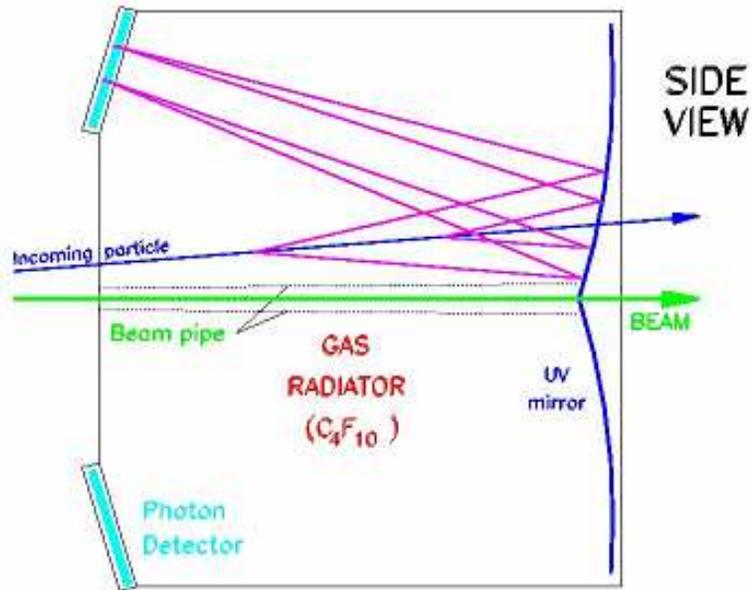
$$\Delta n = n-1 \approx \frac{1}{2} M^2/p^2$$

# LES DÉTECTEURS "RICH" (*Ring Image Cherenkov* ...ou à imagerie annulaire)

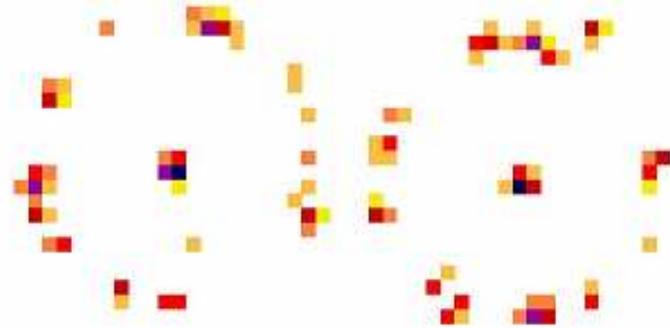
- L'angle du cône est une mesure de la vitesse (en fait:  $\beta-1$ )
- Deux types de focalisation.



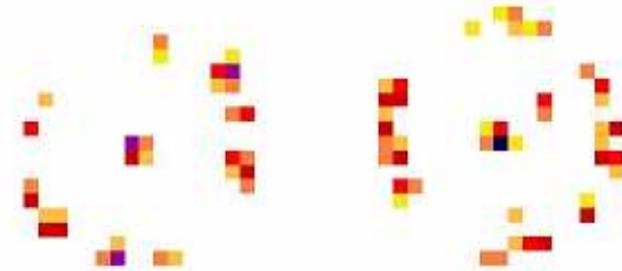
# Le "RICH" de l'expérience COMPASS au CERN



$\pi^+$  (3 GeV/c) - HV = 2050 V

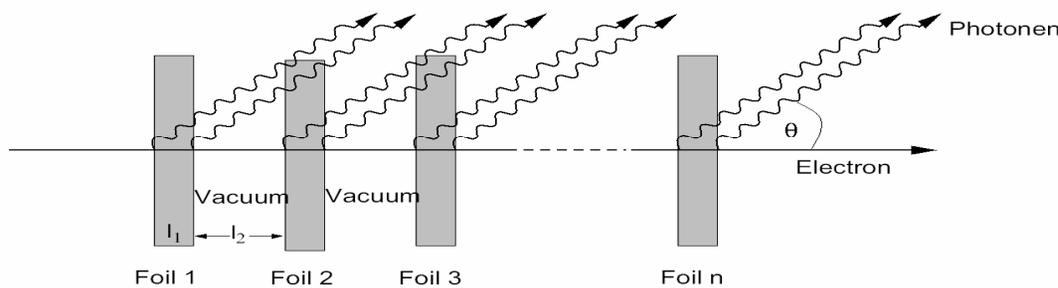


p (3 GeV/c) - HV = 2050 V



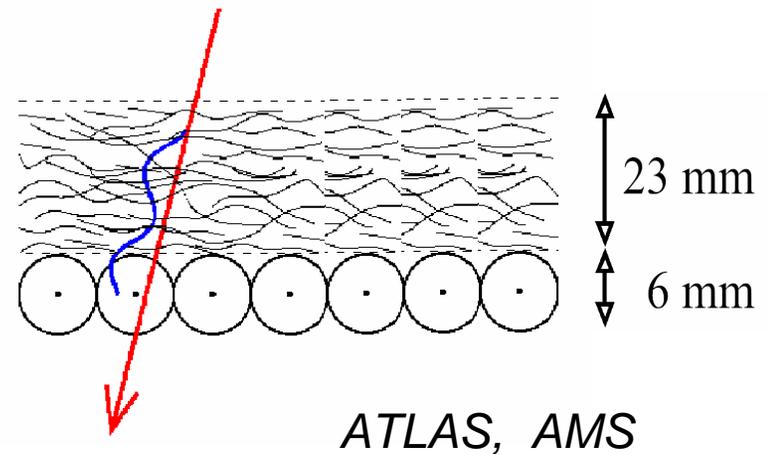
# DÉTECTEURS À RADIATION DE TRANSITION (TRD)

- Cherenkov:  $N_{PH} \sim \sin^2\theta_C \sim \Delta n \sim M^2/p^2 \rightarrow 0$  à haute énergie.  $(1-\beta)$
- Il existe un effet donnant un signal  $\sim \delta_{\text{Lorentz}}$ : **La radiation de transition.**
- Cette radiation X est émise lorsqu'une particule ultrarelativiste traverse la frontière entre deux milieux de constantes diélectriques  $\epsilon$  différentes. La probabilité est de l'ordre de  $\alpha_{EM} = 1/137$ .



$\gamma$	$\gtrsim$	1000
$N_{Ph}$	$\mathcal{O}$	$\alpha_{em} \times N_{tr}$
$E_{Ph}$	$\sim$	$\gamma \times 1 \text{ eV}$
$\theta_{Ph}$	$\sim$	$1/\gamma$

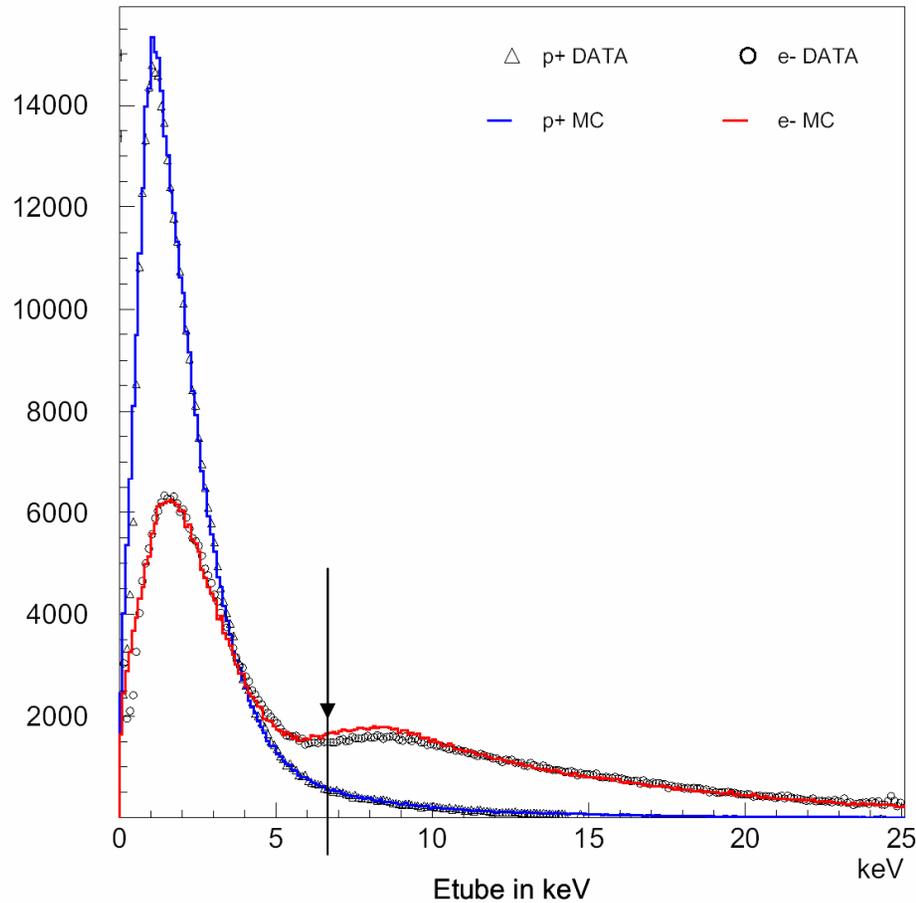
- On utilise des fibres, des mousses, laines, ... pour maximiser le le nombre de transitions.
- Les rayons X (en plus de l'ionisation de la particule) sont détectés par des compteurs cylindriques à gaz de type "paille".
- Le gaz est **Xe/CO<sub>2</sub>**, Z=54 (pour détecter les X)
- On empile les couches fibres/détecteurs



# Séparation électrons/protons avec TRD

## 20 GeV Tube Spectra

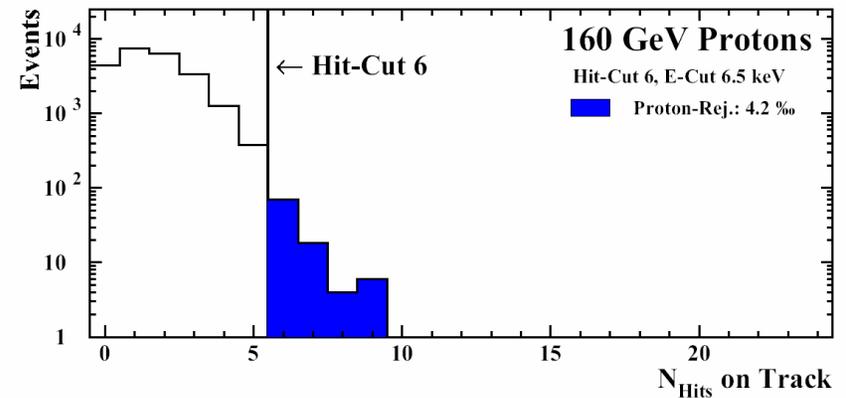
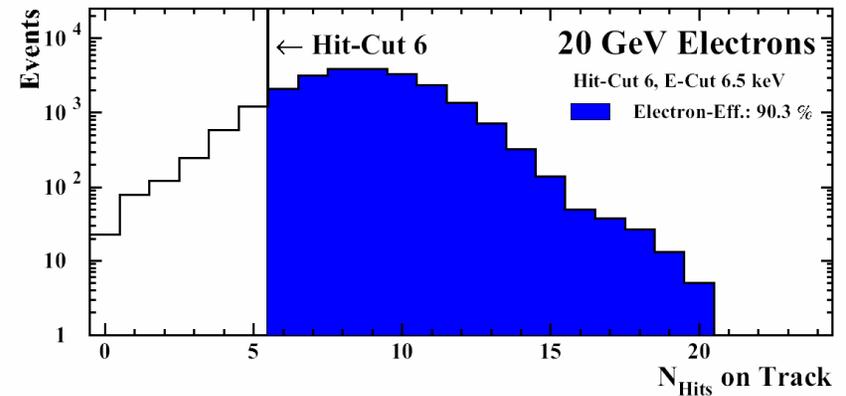
Th. Kirn, G.Schwering, RWTH Aachen



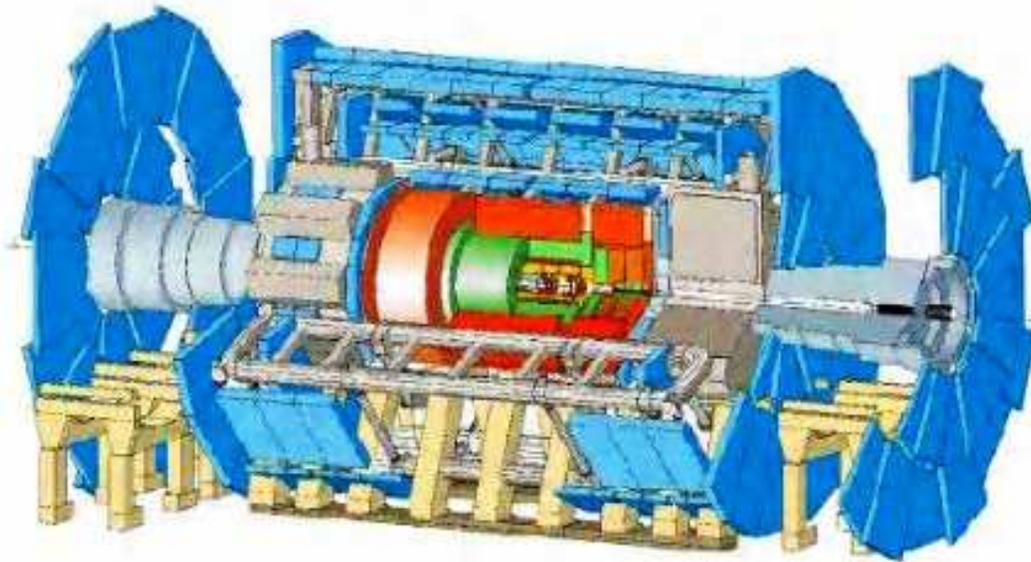
$\Rightarrow$  CC: Hits in a tube with  $E > 6.5$  keV  $\rightarrow$  TR-Hit  
 $\Rightarrow$  LH: energy-loss distributions  $P_{e,p}^i(E_i)$  per tube for  $e^-$  and  $p^+$ .

## Cluster Counting

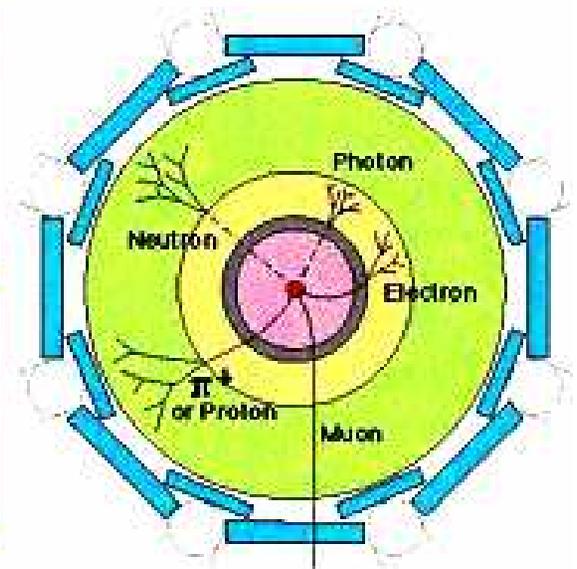
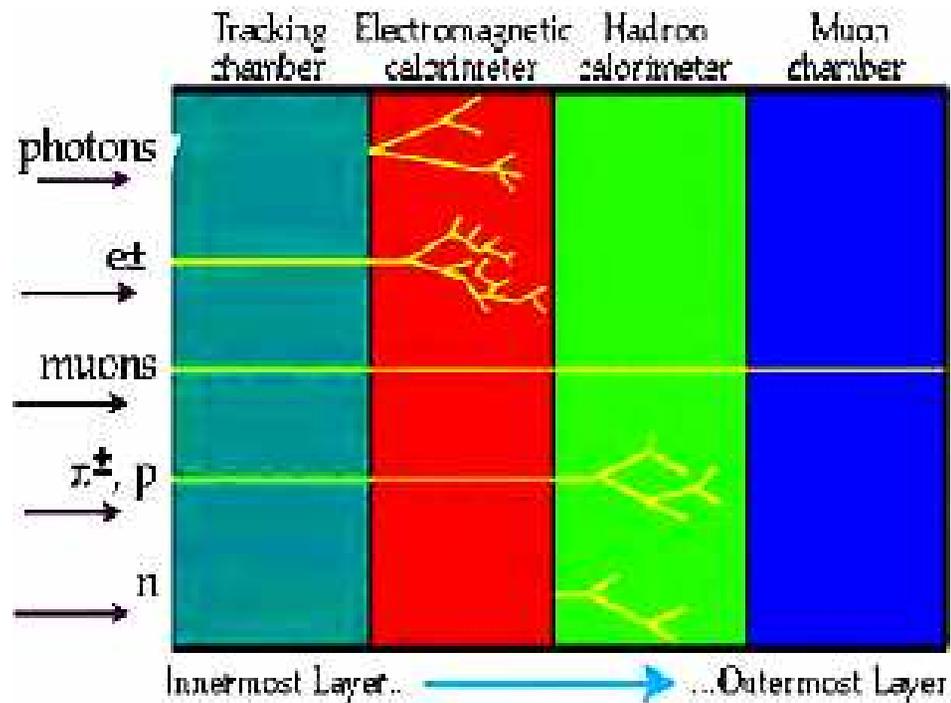
### $H_{\text{cut}}$ Definition



# ATLAS

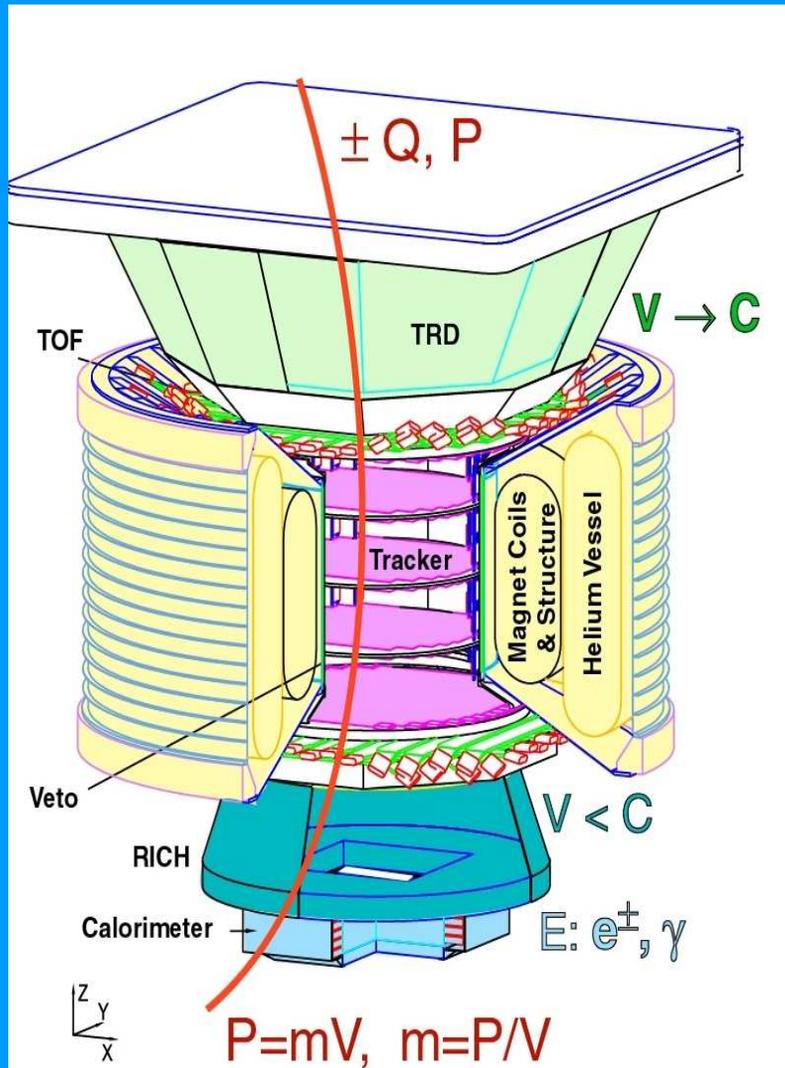


Les interactions des  
diverses particules



# Identification des rayons cosmiques primaires avec AMS

(en attente de transport vers l'ISS)



0.3 TeV	$e^-$	P	He	C	Fe	$\gamma$	$\gamma$
TRD							
TOF							
Tracker							
RICH							
ECAL							

*Le sens de la courbure de la trajectoire détermine le signe particule-antiparticule*

Le projet AMS

