

# Principes de détection et conception des détecteurs

# Plan

- Interaction particules (surtout chargées) / matière
- Détecteurs gazeux
- Détecteurs semi-conducteurs
- Détecteurs de photons visibles, scintillateurs
- Interaction des photons avec la matière
- Calorimétrie électromagnétique et hadronique
- Quelques mots sur la simulation
- Conclusion

# Bibliographie

- C. Grupen, Particle Detectors, (Cambridge University Press ,1996)
- G. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 3<sup>ème</sup> édition (2000)
- W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, 2<sup>ème</sup> édition (Springer, 1994)
- W. Blum, L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers (Springer, 1994)
- R. Fernow, Introduction to experimental particle physics (Cambridge University Press, 1992)
- Review of Particle Physics, C. Amsler et al., Physics Letters B 667, 1 (2008) (ainsi que le booklet)
- Revues Nuclear Instruments and Methods et Jinst

# Interaction particules/matière

- Ensemble de phénomènes qui nous permettent de détecter une particule :
  - Position d'un point de passage d'une particule
  - Mesure d'une impulsion
  - Mesure d'une énergie
- Ces phénomènes perturbent en même temps la particule observée :
  - Perte d'énergie
  - Changement de direction
- Les particules neutres peuvent être détectées par « transformation » en particule chargée :
  - Diffusion élastique  $np \rightarrow np$
  - Diffusion élastique  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  (effet Compton)
  - $\gamma + \text{noyau} + Ze^- \rightarrow \text{noyau} + (Z-1)e^- + e^-$  (effet photo-électrique)

# Interaction particules chargées/matière

- Problème très complexe :
  - objets complexes (atomes, noyaux) en interaction
  - échelles d'énergie mises en jeu variées (de l'eV au GeV)
- Traitement inévitablement approximatif : Formule de Bethe-Bloch

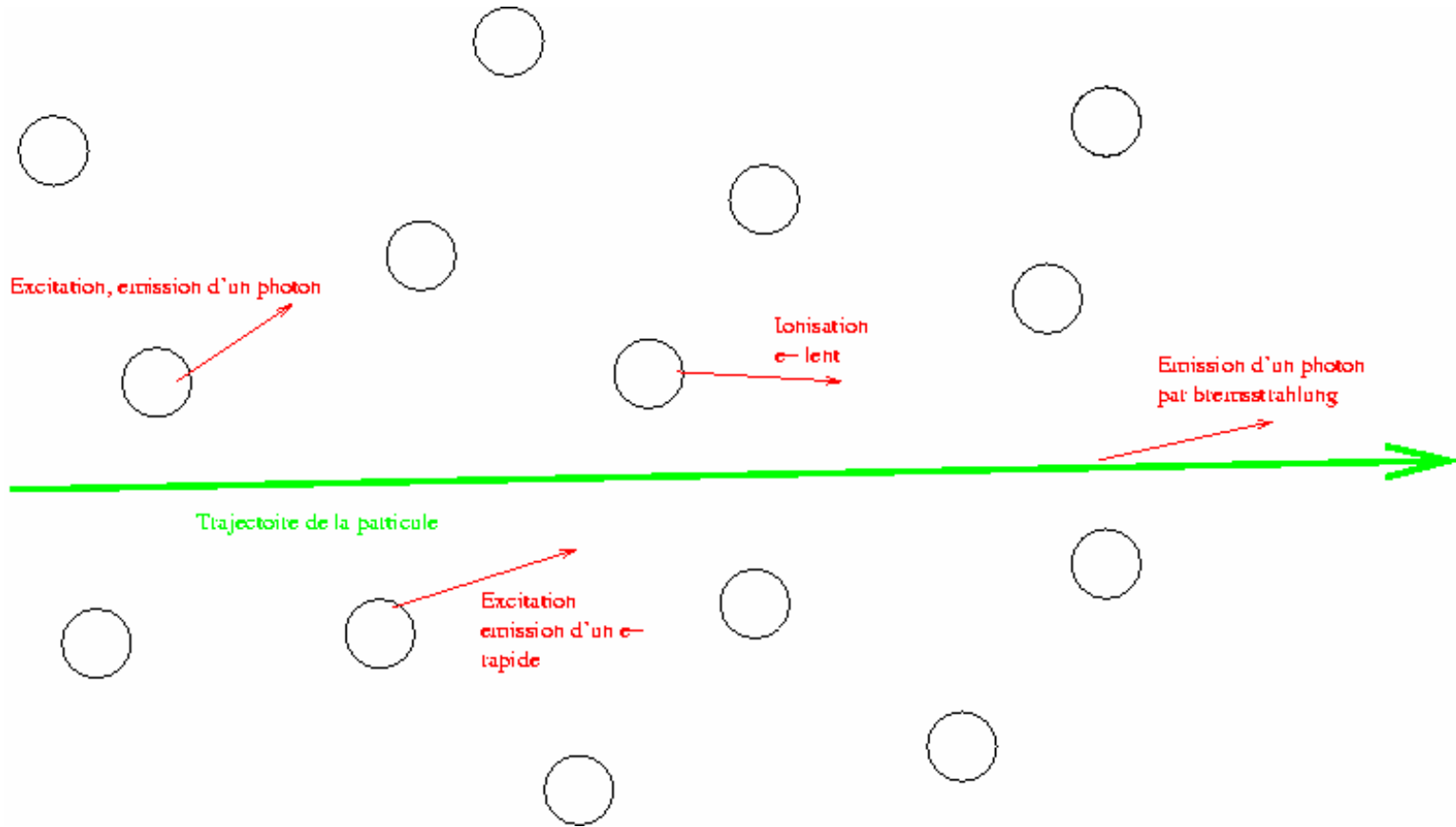
# La formule de Bethe-Bloch et au-delà

- Domaine de validité
- Petits transferts d'énergie
- Grands transferts d'énergie
- Corrections (effet de densité)
- Cas particuliers : les électrons et les positrons
- Notion de parcours
- Point de vue « technologique » : lien entre la formule de Bethe-Bloch et ce que l'on « voit » dans un détecteur
- Les fluctuations : comment les paramétrer, formules de Landau, Vavilov
- But :
  - vocabulaire
  - Compréhension semi-quantitative de l'origine des phénomènes observés
  - Ordres de grandeurs pratiques

# Notations

- $M$  : masse de la particule incidente
- $m$  : masse de l'électron
- $Z$  : Numéro atomique
- $e$  : charge de l'électron
- $N$  : densité de centres diffuseurs (atomes/cm<sup>3</sup>)
- $\beta = v/c$  : vitesse
- $\gamma$  : Facteur de Lorentz,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
- $z$  : charge de la particule incidente (en unités de  $e$ )
- $\eta$  : Energie de transition séparant petits et grands transferts
- $\Delta E_{\max}$  : Energie cinétique maximale transférable par la particule incidente sur un  $e^-$  au repos.

# Que se passe-t-il lors du passage d'une particule dans la matière ?

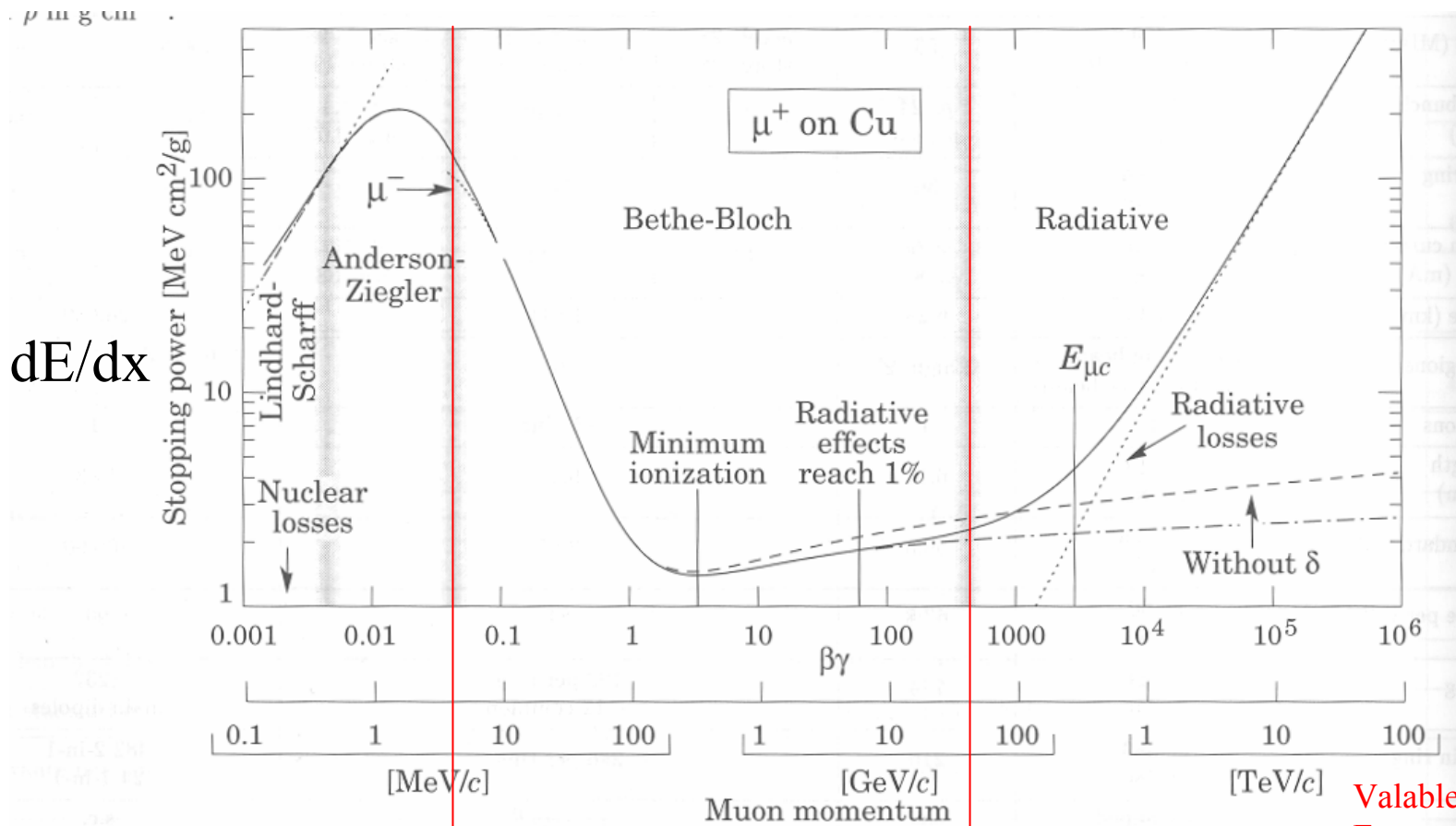




# Ordres de grandeur

- Excitation :  $e^- X \rightarrow e^- X^*$   $\Delta E$  de quelques eV  
à quelques keV
- Ionisation :  $e^- X \rightarrow e^- X^* + e^-$  lent  $\Delta E$  de 100 eV  
à 100 keV
- Excitation :  $e^- X \rightarrow e^- X^* + e^-$  rapide  $\Delta E > 100$  keV
  - Ionisation :  $\Delta E \approx$  Energie de liaison atomique
  - Excitation :  $\Delta E \gg$  Energie de liaison atomique
- Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)  
 $e^- X \rightarrow e^- \gamma X$

# Domaine de validité des calculs (1)



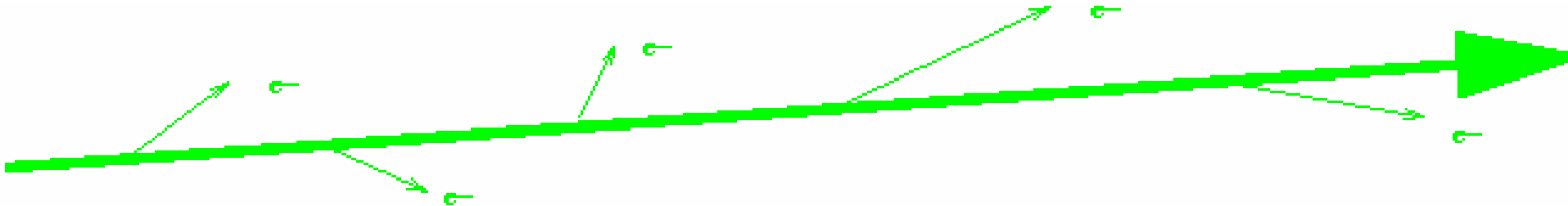
Valable pour les e-  
 Ec est plus grand pour  
 les autres particules

- Tant que le rayonnement de freinage ne domine pas :  $E = E_c = \frac{800 \text{ MeV}}{Z+12}$   
 $\Delta E(\text{ionisation, excitation}) \simeq \Delta E(\text{brem})$
- Dès que  $\beta > \alpha$  (environ 0.01), i.e.  $\beta >$  vitesse des électrons atomiques <sup>10</sup>

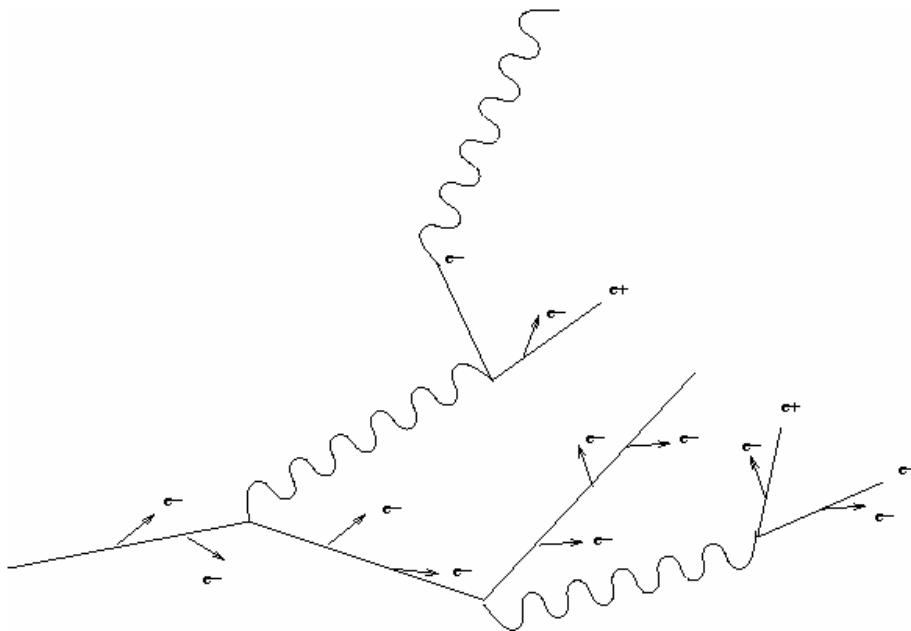
## Domaine de validité (2)

- Petits transferts :  $\Delta E \approx$  énergies de liaison, détails de la structure atomique importants  
→ limite de validité inférieure.
- Grands transferts :  $\Delta E \gg$  énergies de liaison, un atome  $\approx Z$  électrons libres
- Néanmoins, la particule doit garder son « individualité », ce qui n'est le cas que si  $E < E_{\text{crit}}$  → limite de validité supérieure

# Comportement pour $E > E_{\text{crit}}$ et $E < E_{\text{crit}}$

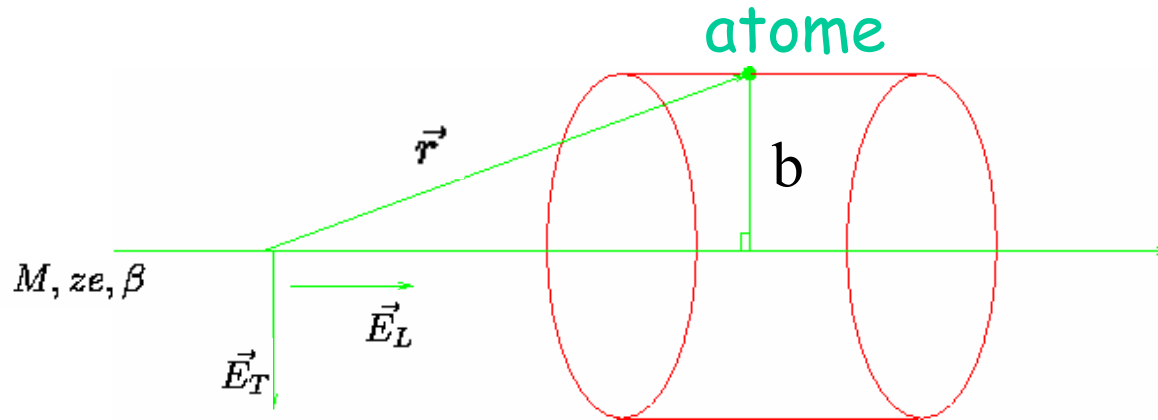


$E < E_{\text{crit}}$  : la particule incidente laisse un « sillage » d'ionisation et d'excitation sur son passage



$E > E_{\text{crit}}$  : la particule incidente développe par bremsstrahlung, création de paires etc une « gerbe » de particules secondaires et perd son individualité.

# Interaction entre une particule et un atome



Impulsion échangée entre la particule incidente et l'atome :

$$\Delta \vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} e \vec{E}_{labo}(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} e \vec{E}_{T labo}(t) dt$$

Transf. Lorentz

$$\vec{E}_{T C.M.} = \frac{ze\hbar}{r^2} \implies \frac{\gamma ze\hbar}{(b^2 + \gamma^2 \beta^2 t^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\Delta \vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} e \vec{E}_{T labo}(t) dt = \frac{2ze^2}{h\beta}$$

Hypothèse implicite:  
Transfert pas trop grand  
(la particule va tout droit)

$$\Delta E = \frac{\Delta(p^2)}{2m} = \frac{2z^2 e^4}{mh^2 \beta^2}$$

# Transfert d'impulsion sur les noyaux

$$\Delta E = \frac{\Delta(p^2)}{2m} = \frac{2z^2 e^4}{mb^2 \beta^2}$$

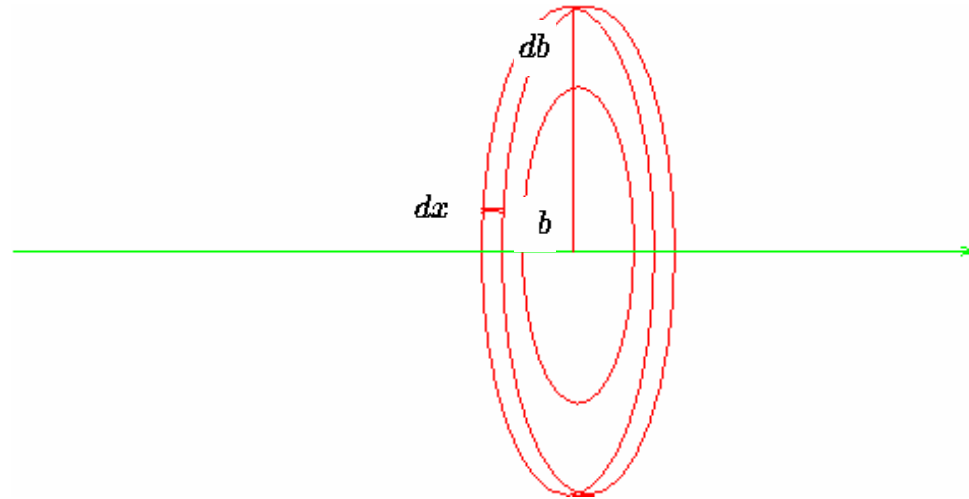
- Formule valable pour une interaction particule/électron atomique
- Transfert sur un noyau : on remplace  $m$  par  $A m_{\text{proton}}$  dans l'expression de  $\Delta E$

$$\frac{\Delta E_{\text{electrons}}}{\Delta E_{\text{noyaux}}} = \frac{Z}{m_e} \times 2 \frac{Z M_p}{Z^2} \simeq 4000$$

Conclusion : les transferts sur les noyaux sont négligeables

# D'une interaction unique à un milieu matériel

- Dénombrement de tous les électrons susceptibles d'interagir
- Intégration sur toutes les valeurs possibles de paramètres d'impact



Nombre d'e- susceptibles d'interagir :  $N Z 2\pi b db dx$

# Calcul de l'intégrale

$$dE(b) = -NZ2\pi b db dx \Delta E(b)$$

$$dE = -NZ dx 2\pi \int \Delta E(b) b db$$

$$\frac{dE}{dx} = -4\pi NZ \frac{z^2 e^4}{m_e \beta^2} \ln \left( \frac{b_{max}}{b_{min}} \right)$$

Problème : l'intégrale diverge ! On peut en limiter les bornes en utilisant des arguments un peu qualitatifs.

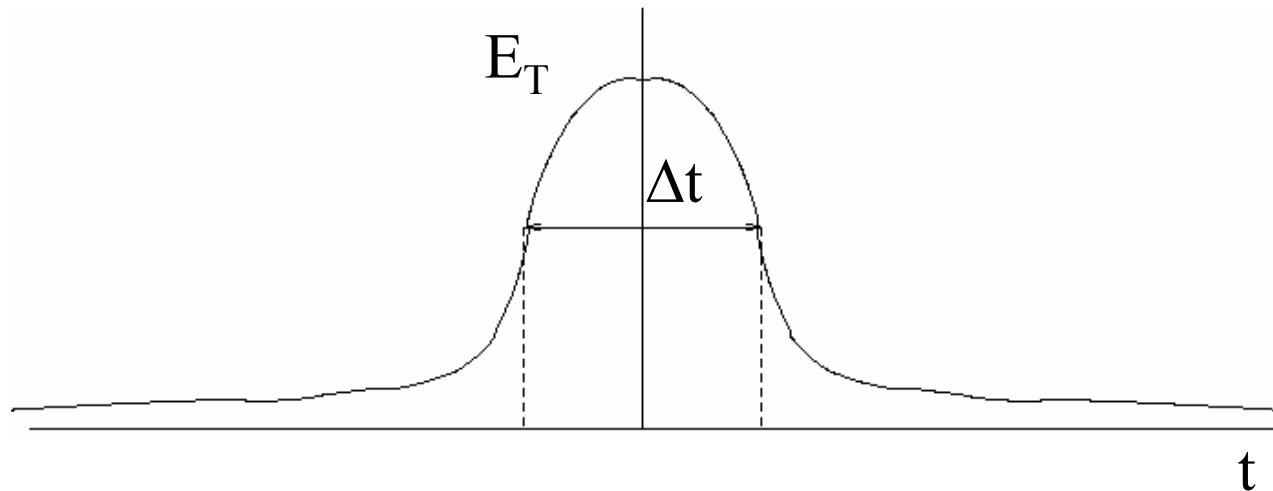


# Du côté de $b_{\max}$

- $B$  grand  $\Leftrightarrow \Delta E(b)$  petit
- Les électrons sont liés aux noyaux. On demande donc que :  $\Delta E(b) > I$   
( $I$ =potentiel d'ionisation)
- Par ailleurs  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$
- $\Delta t$  Durée caractéristique de l'interaction

# Durée caractéristique de l'interaction

$$\vec{E}_{TC.M.} = \frac{zeb}{r^3} \implies \frac{\gamma zeb}{(b^2 + \gamma^2 \beta^2 t^2)^{\frac{3}{2}}} = E_T(t)$$

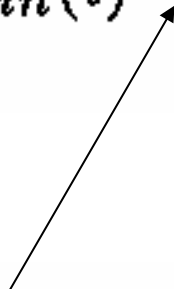


$$\Delta t \simeq \frac{b}{\gamma\beta} \quad \Delta E_{min} \Delta t_{max} \simeq \hbar \Leftrightarrow b_{max} = \frac{\hbar\beta\gamma}{I}$$

# Qu'est-ce que I ?

Pour un atome à plusieurs couches électroniques

$$\frac{dE}{dx} = -4\pi N \frac{z^2 e^4}{m\beta^2} \sum_i f_i \int_{b_{\min}^{(i)}}^{b_{\max}^{(i)}} \Delta E(b) b db$$

$$\sum_i \ln \frac{\hbar \gamma \beta}{E_i b_{\min}^{(i)}}$$


On définit :  $Z \ln I = \sum_i f_i \ln E_i$

## Du côté de $b_{\min}$

- On utilise l'expression de  $\Delta E_{\max}$  : on peut montrer  $\Delta E_{\max} \simeq 2mc^2\beta^2\gamma^2$

$$\text{Or, } \Delta E = \frac{2z^2 Z^2 e^4}{b^2 \beta^2 m}$$

$$\text{D'où } \Delta E = \Delta E_{\max} \implies b_{\min} = \frac{ze^2}{\gamma\beta^2 m} \quad (Z = 1)$$

# Résultat final

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{2\pi z^2 e^4}{m\beta^2} N Z \ln \frac{2m\gamma\beta^3}{I^2} + \text{constantes}$$

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{2\pi z^2 e^4}{m\beta^2} N Z \left( \ln \frac{2m\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

Formule correcte : on n'est pas trop loin...

# Remarques importantes

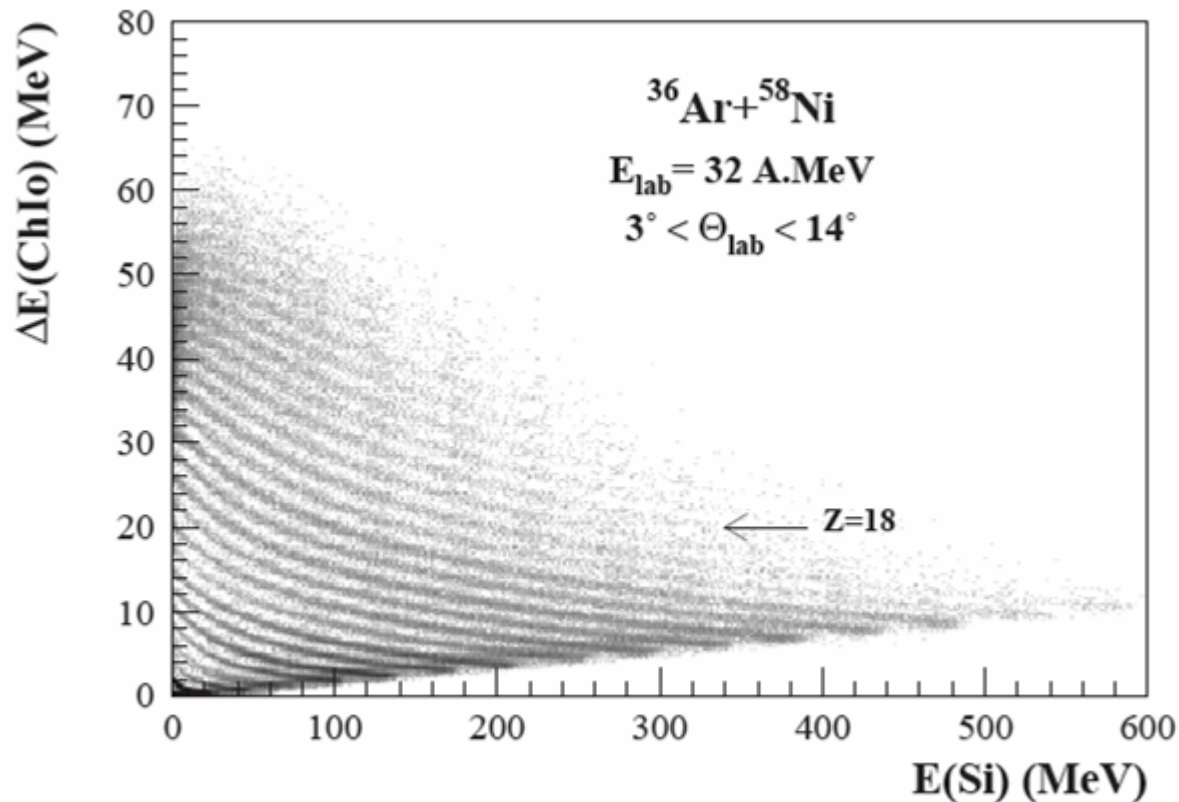
$$\frac{dE}{dx} = - \frac{2\pi z^2 e^4}{m\beta^2} N Z \left( \ln \frac{2m\gamma^2\beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

- La masse de la particule incidente n'intervient pas.
- $dE/dx$  décroît comme  $\beta^{-5/3}$  pour  $\beta\gamma \leq 3$ .
- $dE/dx$  a un minimum aux alentours de  $\beta\gamma \approx 3$ . Sa position dépend de  $I$ , mais la dépendance est en pratique faible.
- Au-delà du minimum,  $dE/dx$  remonte en  $\ln(\gamma)$  (remontée relativiste). Peut s'interpréter comme provenant du fait que  $E_T$  a un effet sur des atomes de plus en plus éloignés de la trajectoire de la particule.
- A très haute énergie, la remontée relativiste est interrompue par l'effet de densité : la polarisation du milieu écrante le champ électrique pour les atomes les plus lointains.

# Exemple d'application en physique nucléaire

## nucléaire

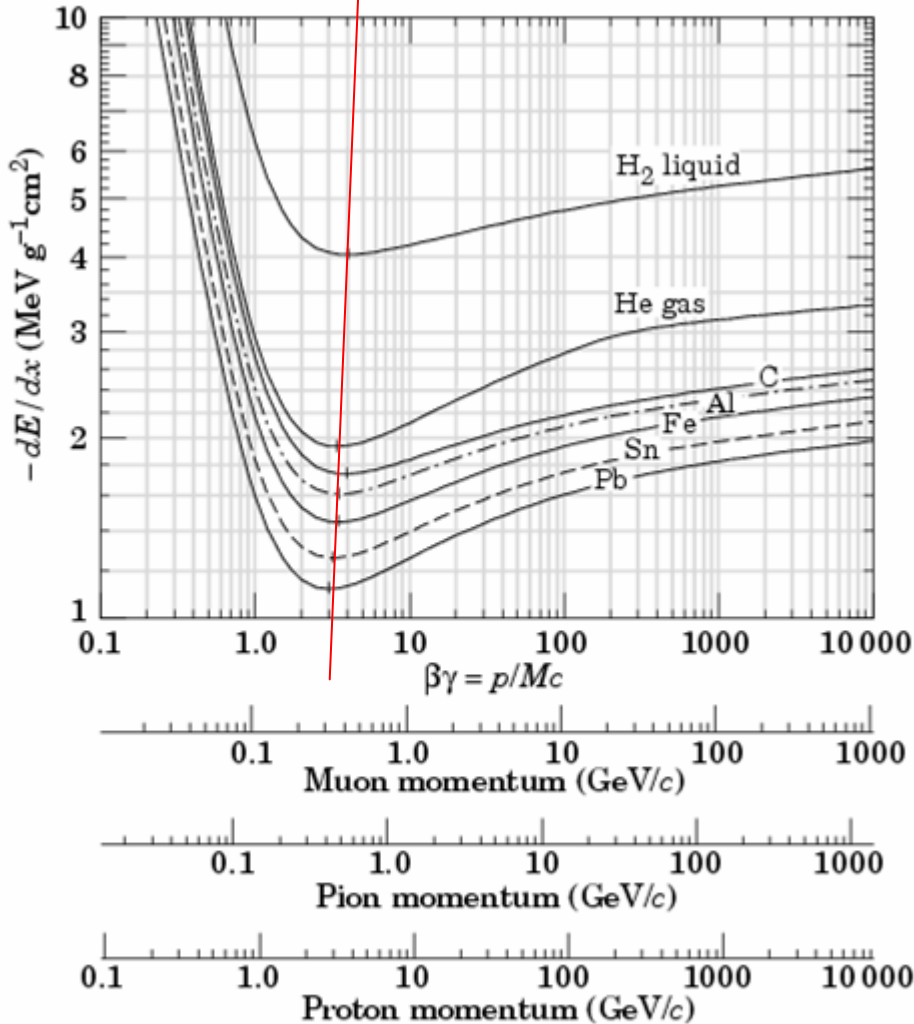
- Pour  $\beta$  petit,  $\gamma \sim 1$ , et  $dE/dx \sim Az^2/E$
- Les particules de même  $z^2$  et de différents  $E$  se trouvent sur une hyperbole dans le plan  $E-\Delta E$



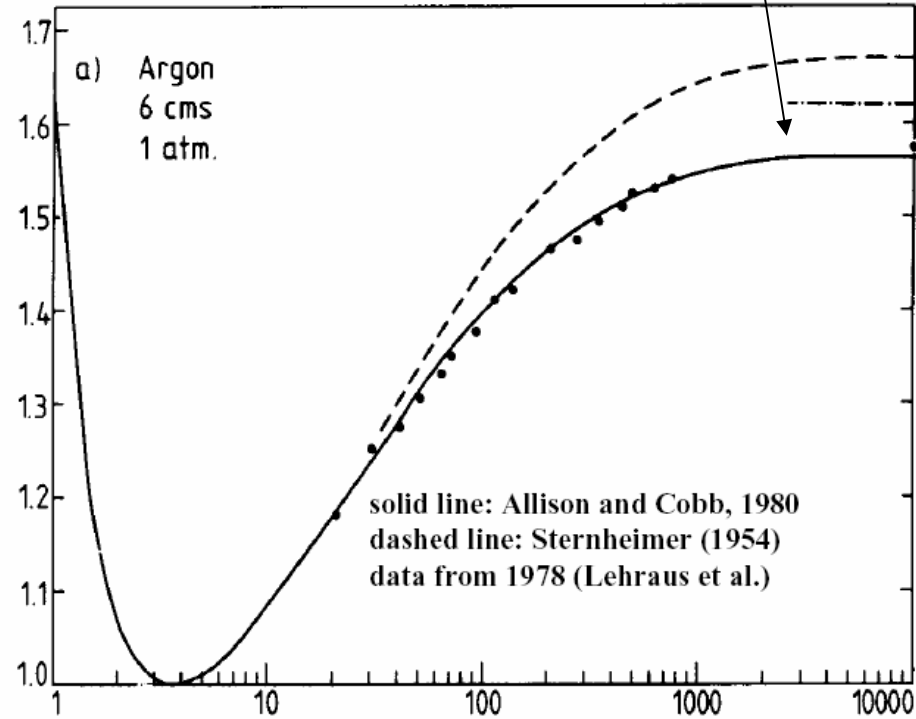
(INDRA)

# Liquides et solides

Position du minimum



Plateau de Fermi



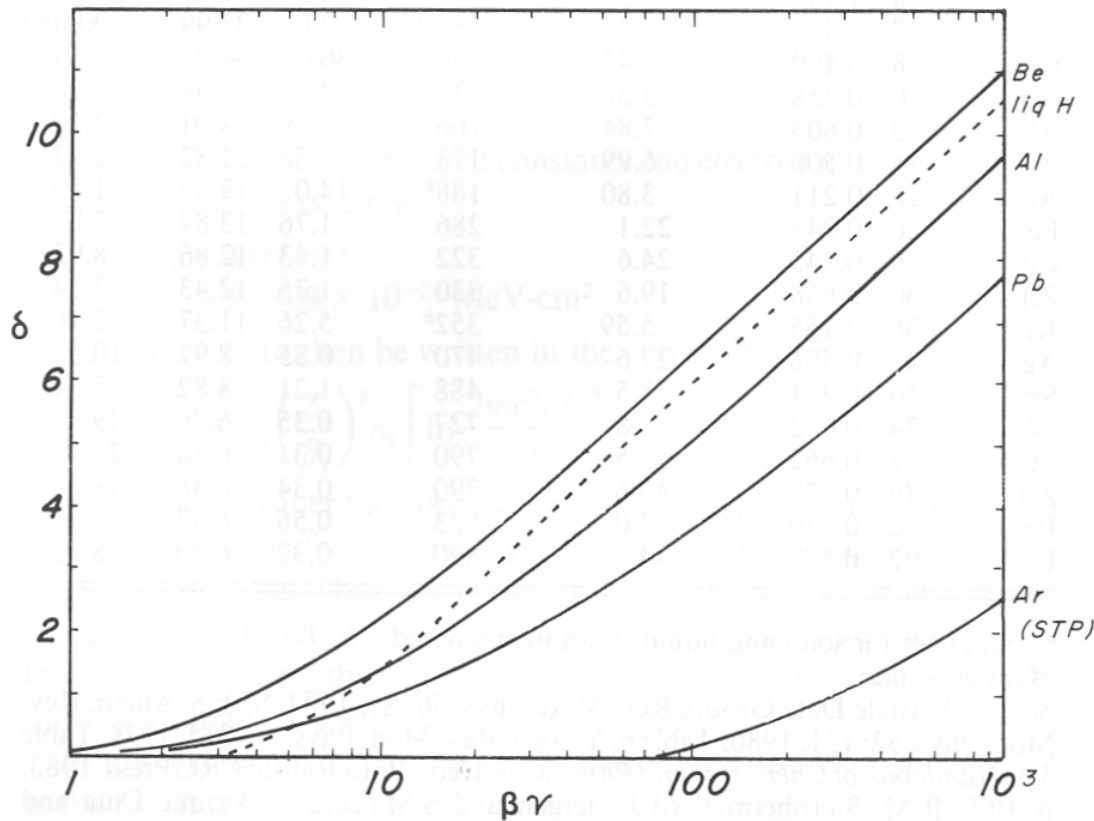
Cas d'un gaz  $\beta\gamma$

L'effet de densité est sensible dès le minimum pour les solides et liquides, il n'apparaît que plus haut pour les gaz



# Paramétrisation de l'effet de densité

**Figure 2.5** Density effect correction parameter  $\delta$  for several materials. (The parameter was calculated using the formulas and coefficients given in R.M. Sternheimer, M.J. Berger, and S.M. Seltzer, Atomic Data and Nuclear Data Tables 30: 261, 1984.)



Effet sensible  
surtout pour les solides  
et liquides

Apparaît seulement à  
haute énergie dans les  
gaz

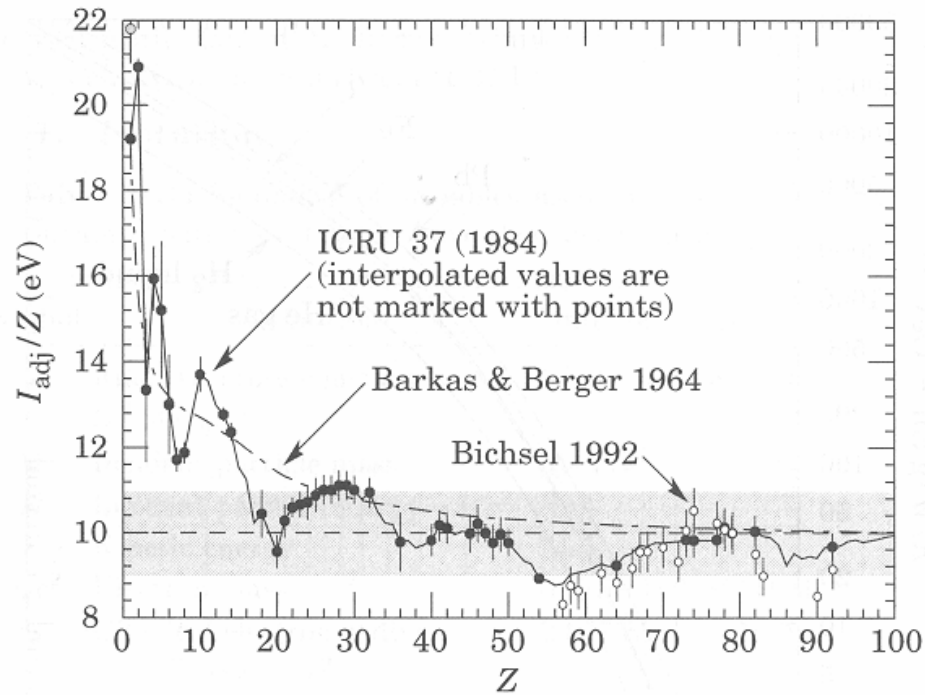
# Cas particulier des électrons

- Différences avec les autres particules (lourdes) : il s'agit des particules (ou des antiparticules) des électrons atomiques
- Même masse :  $\Delta E_{\max}$  différent des particules lourdes
- Influence du spin (mécanique quantique)

$$\frac{dE}{dx} = \frac{-2\pi N Z e^4}{m} \left( \ln \frac{m^2 \gamma^2 \beta^2 (\gamma - 1)}{I^2} - a \right)$$

$a=2.9$  (positrons) ou  $3.6$  (électrons)

# Relation entre I et Z



Paramétrisations utiles :  $16 Z^{0.9}$

$10 Z$

Ordre de grandeur : quelques centaines d'eV

# Dépendance en la densité du matériau

$$N \times A = \rho \mathcal{N}$$

$$NZ = \rho \mathcal{N} \frac{Z}{A}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 \mathcal{N}}{m} z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left( \ln \frac{2m\gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \quad \text{ne dépend pas de la densité du matériau}$$

En pratique, pour  $Z/A \approx 1/2$ ,  $I=200$  eV,  $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  vaut  $2 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1}$

Très utile pour les calculs d'ordres de grandeur

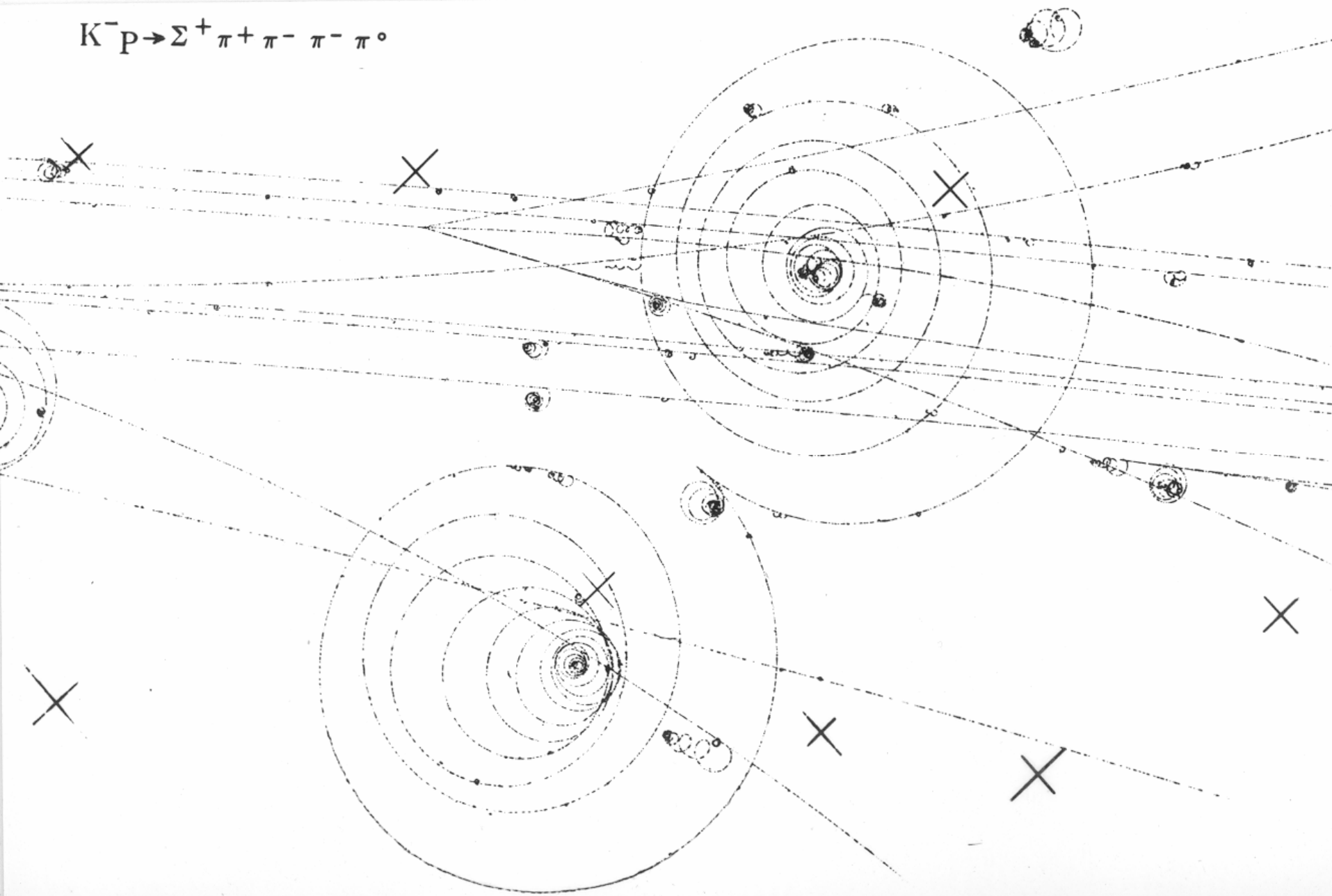
# Exemples d'utilisation

- Combien d'énergie est déposée par un muon de 10 GeV dans une raquette de scintillateur d'épaisseur 1 cm ?
- Combien d'énergie est perdue par un muon de 10 GeV dans une chambre de 1 cm d'épaisseur ?
- Combien de mètres de béton faut-il pour arrêter un faisceau de muons de 450 GeV ?
- Combien d'air faut-il pour arrêter une particule  $\alpha$  de 2 MeV ?

# Réponses

- Un muon de 10 GeV est quasiment au minimum d'ionisation. Pour du scintillateur,  $\rho=1$ . Donc,  $dE/dx=1\text{cm} \cdot 1^2=2 \text{ MeV}$
- La densité du gaz est de l'ordre de 0.001 . Donc  $dE/dx=0.001 \cdot 1^2=2 \text{ keV}$
- Des muons de 450 GeV sont au minimum d'ionisation. La densité du béton est de 2.5 . Il faut donc  $450\,000/2/2.5=900 \text{ m}$  de béton
- Une particule  $\alpha$  de 2 MeV est en-dessous du minimum d'ionisation.  $\beta=0.03$ , donc  $dE/dx=2 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1} \times 0.03^{-5/3}=700 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1}$ , soit 0.7 MeV/cm dans l'air. Elle s'arrête en 2-3 cm.

$K^- p \rightarrow \Sigma^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$

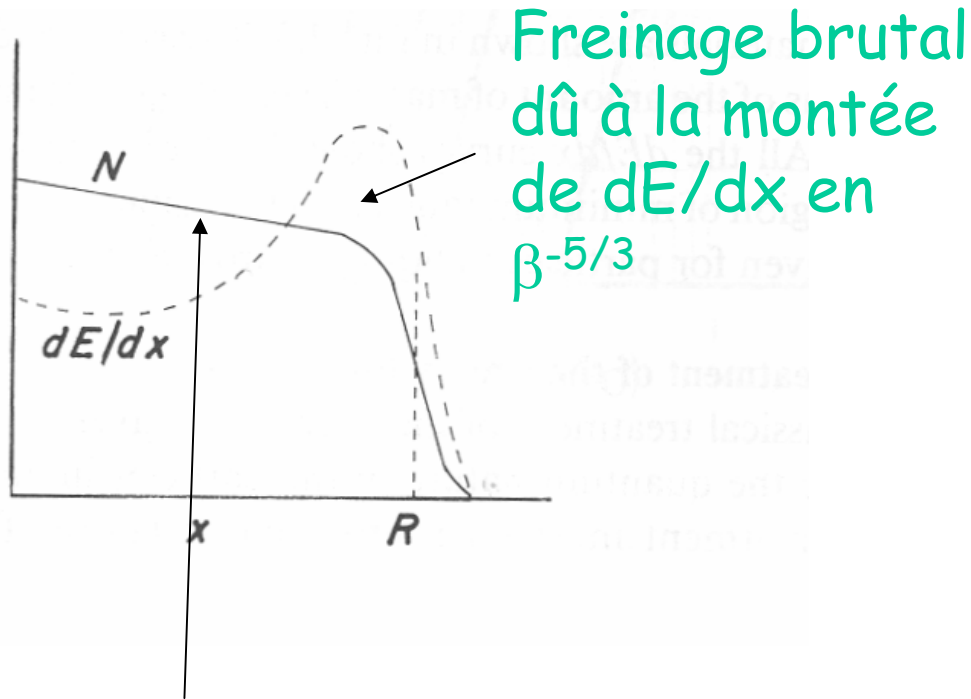


# Parcours

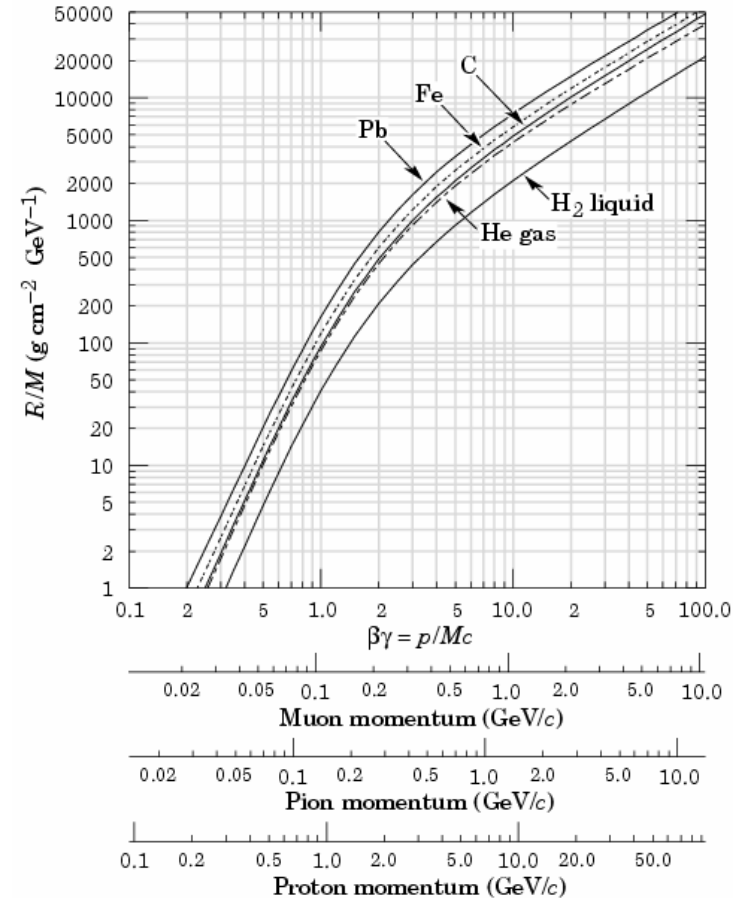
- Distance parcourue par une particule donnée d'énergie initiale donnée dans un matériau.
- On peut le définir ainsi :  $\int_0^R \frac{dE}{dx} dx = E_{initiale}$
- Pas de solution analytique, on utilise des tables ou on intègre numériquement
- Notion surtout utile à basse énergie...



# Utilisation du parcours



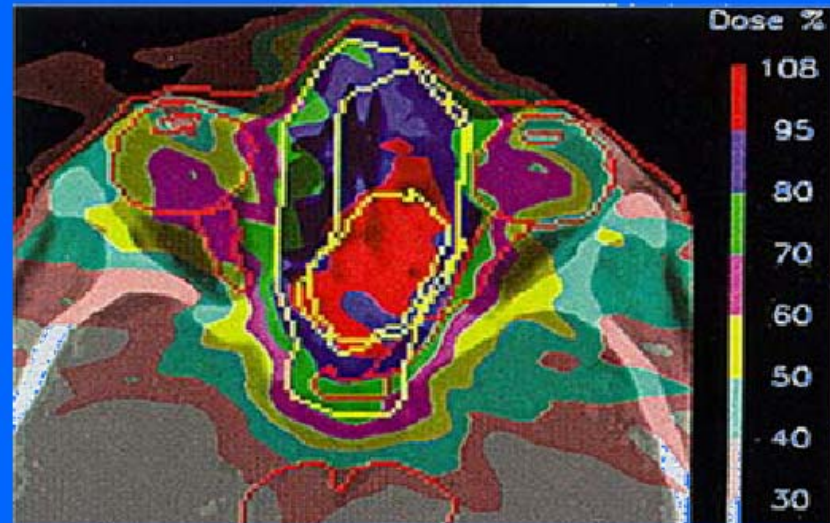
Décroissance lente due aux (rares) interactions à grand transfert.



Utile en médecine nucléaire !

# Radiothérapie

## Radiotherapy with X-rays



IMRT - 9 different photon beams

The limit is due to the dose given to the healthy tissues!

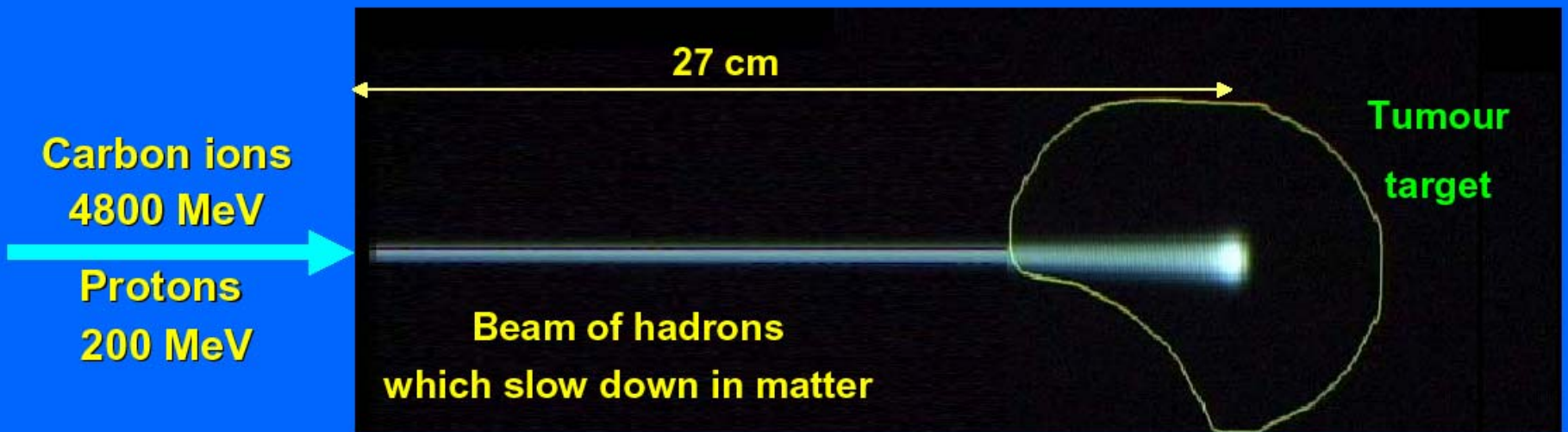
Especially near organs at risk (OAR)

S. Braccini

- Electron linacs to produce gamma rays (called X-rays by medical doctors)

# Principe de l'hadronthérapie

## *The basic principles of hadrontherapy*



- First idea:
  - Bob Wilson, 1946
- Bragg peak
  - Better conformity of the dose to the target → healthy tissue sparing

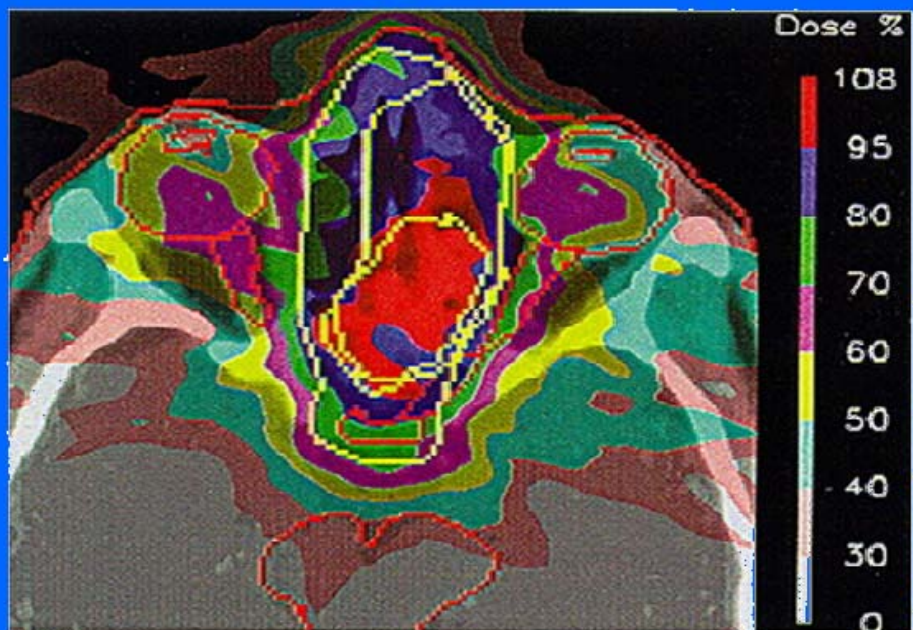
S. Braccini

# Comparaison radio/hadronthérapie

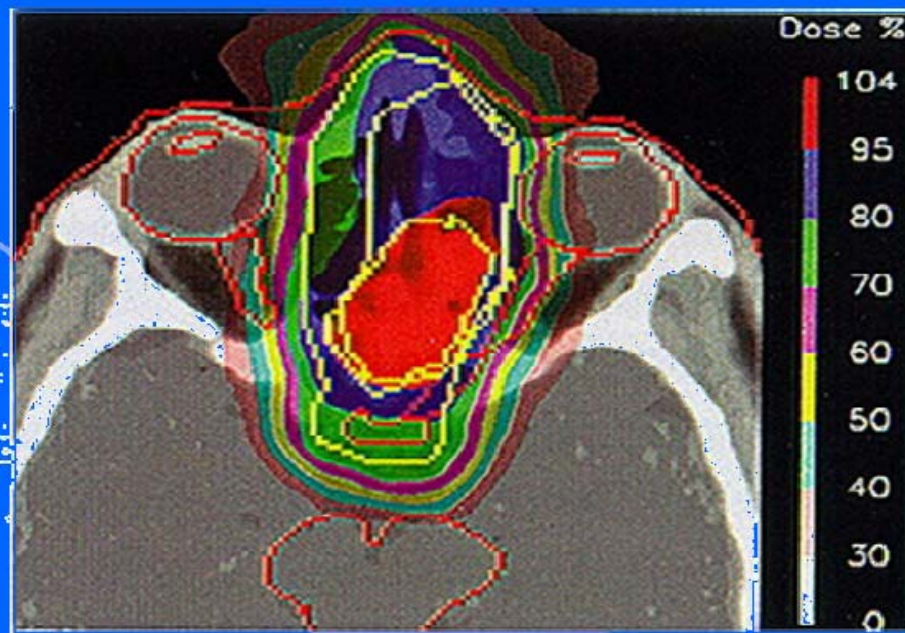
Tumour between the eyes

S. Braccini

IMRT - 9 X-ray beams



1 proton beam



# Fluctuations du dépôt d'énergie

- La formule de Bethe-Bloch décrit un comportement moyen
- D'une particule à l'autre, variations de comportement dues :
  - Au caractère discret des interactions
  - A l'aspect quantique des interactions individuelles

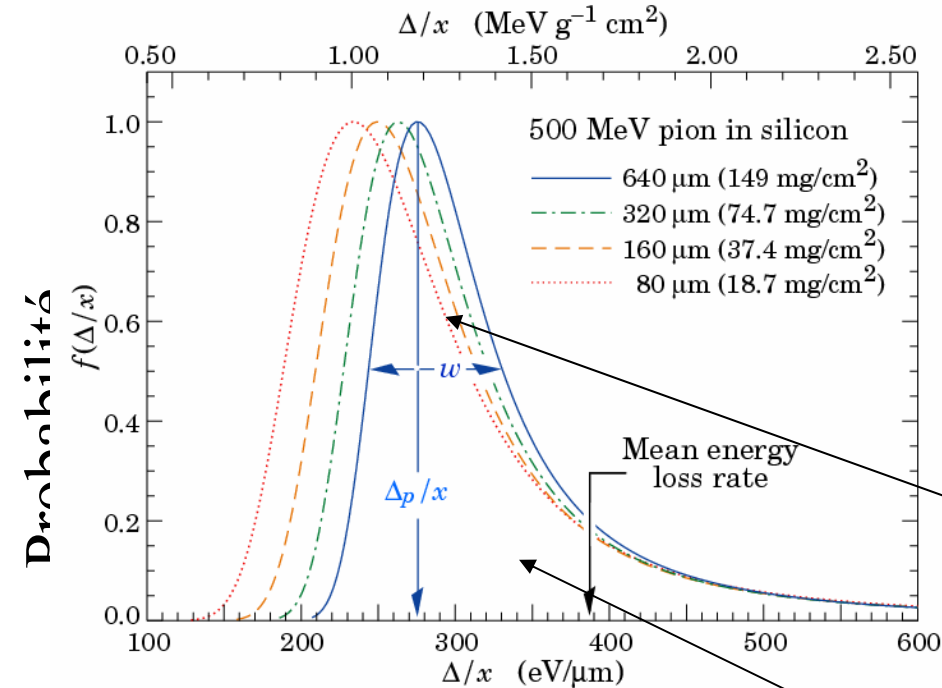
# Absorbeur épais

- Dans ce cas, un nombre important d'interactions individuelles contribuent à la perte d'énergie totale : on peut appliquer le théorème central limite, les fluctuations sont gaussiennes
- En pratique : c'est le cas si au moins 50% de l'énergie initiale est absorbée. Rare en pratique pour un détecteur, sauf pour un calorimètre...

# Absorbeur mince

## • Cas le plus courant

- Queues importantes
- Dues à des interactions « dures », mais peu probables
- Les queues sont souvent un problème quand on cherche à mesurer  $dE/dx$ .



$$\Delta_p = \xi \left[ \log \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2}{I} + \log \frac{\xi}{I} + j - \beta^2 - \delta(\beta\gamma) \right]$$

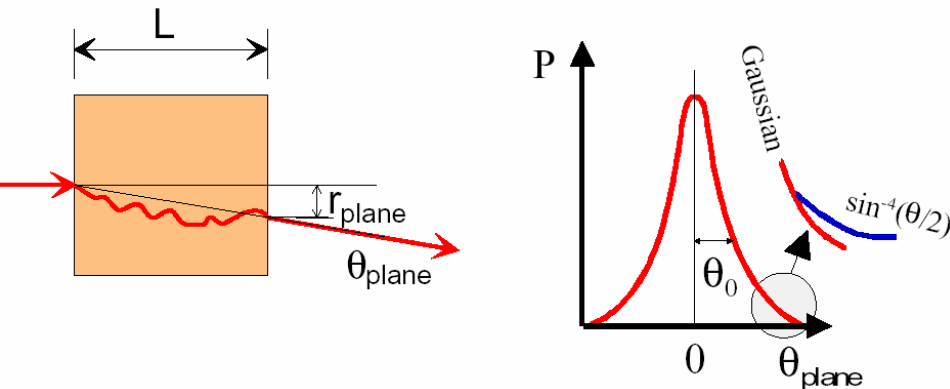
$$\xi = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \times Z/A \times (x/\beta^2)$$

Distributions de Landau

Perte d'énergie par unité de longueur dans le silicium

# Diffusion multiple

- Chaque interaction a un effet sur la direction de la particule interagissante
- Transfert d'énergie  $\Leftrightarrow$  Transfert d'impulsion  $\Leftrightarrow$  changement de direction
- En moyenne, l'effet est nul, mis à part les fluctuations



$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left\{ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{L}{X_0} \right) \right\}$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g.cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{space}^{RMS}$$

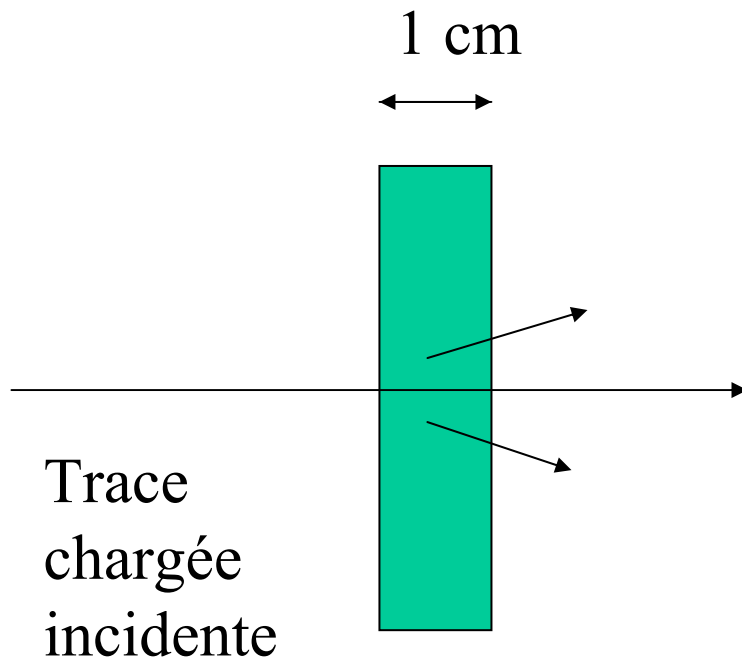


# Que voit un détecteur ?

- Un détecteur est en général constitué d'absorbeurs minces
- Les « rayons  $\delta$  » (électrons rapides éjectés) peuvent arriver à s'extraire  
 $\Rightarrow$  le détecteur ne voit qu'une fraction de la perte d'énergie totale.

# Exemples typiques

- Raquette de scintillateur plastique



Tout électron (rayon  $\delta$ ) de plus de l'ordre de 1 MeV sortira en ne déposant qu'une fraction de son énergie.

# Exemples typiques

- Détecteur gazeux : le signal est initié par l'ionisation déposée dans un rayon de quelques mm autour de la trace.
- Un parcours de quelques mm correspond (à la pression atmosphérique) à une énergie de 10 keV  $\Rightarrow$  tout électron ou particule éjectée de plus de 10 keV ne contribue pas au signal déposé

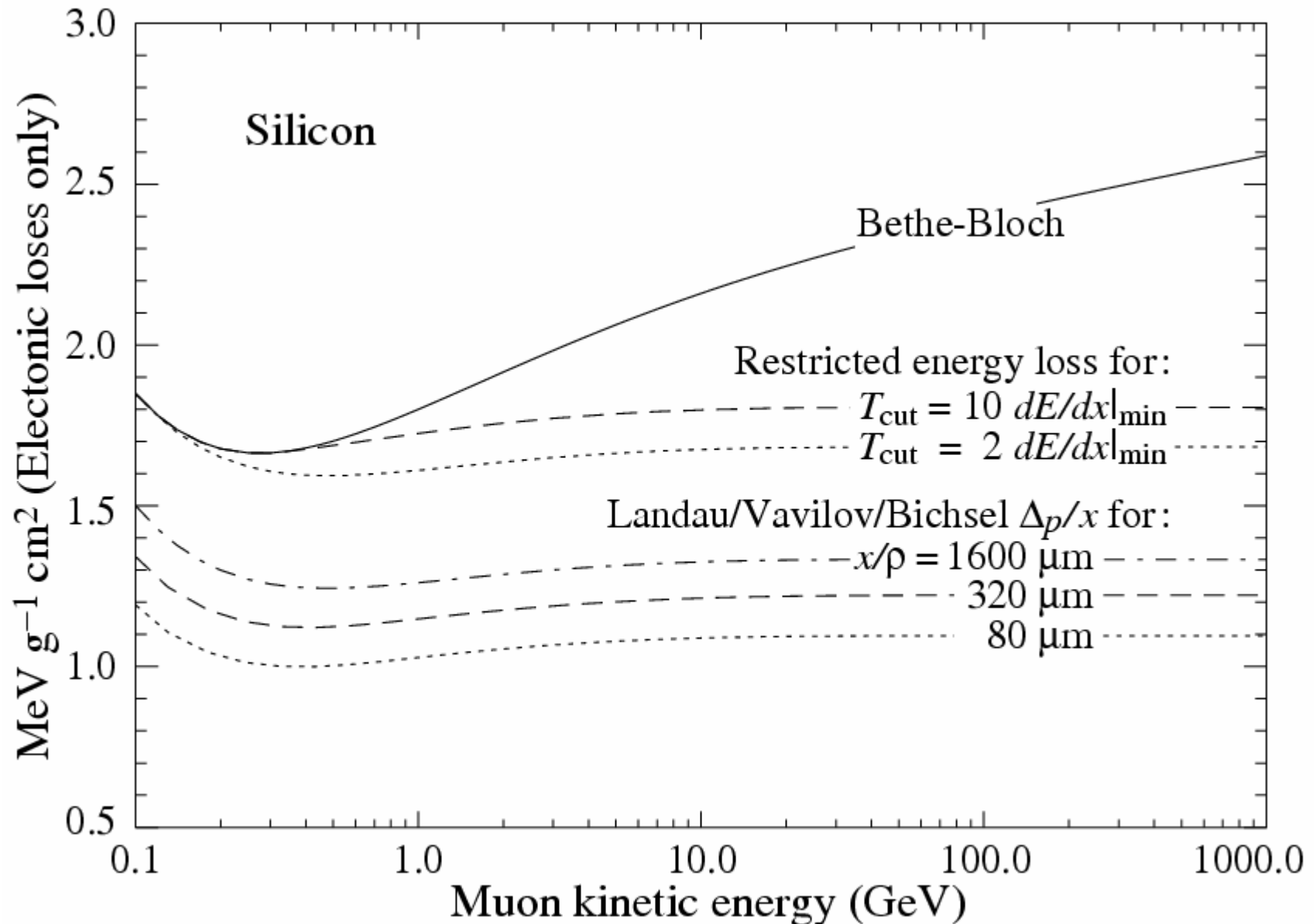
# Formule de Bethe-Bloch

## « restreinte »

- Il nous faut donc pour étudier un détecteur une expression de la perte d'énergie moyenne due à des transferts d'énergie n'excédant pas une certaine valeur :

$$\frac{dE}{dx} = -2\pi N Z \frac{z^2 e^4}{m\beta^2} \left( \ln \frac{2m\gamma^2 \beta^2 E_{cut}}{I^2} - \frac{\beta^2}{2} \left( 1 + \frac{E_{cut}}{\Delta E_{max}} \right) - \frac{\delta}{2} \right)$$

# Formules de Bethe-Bloch et de Landau



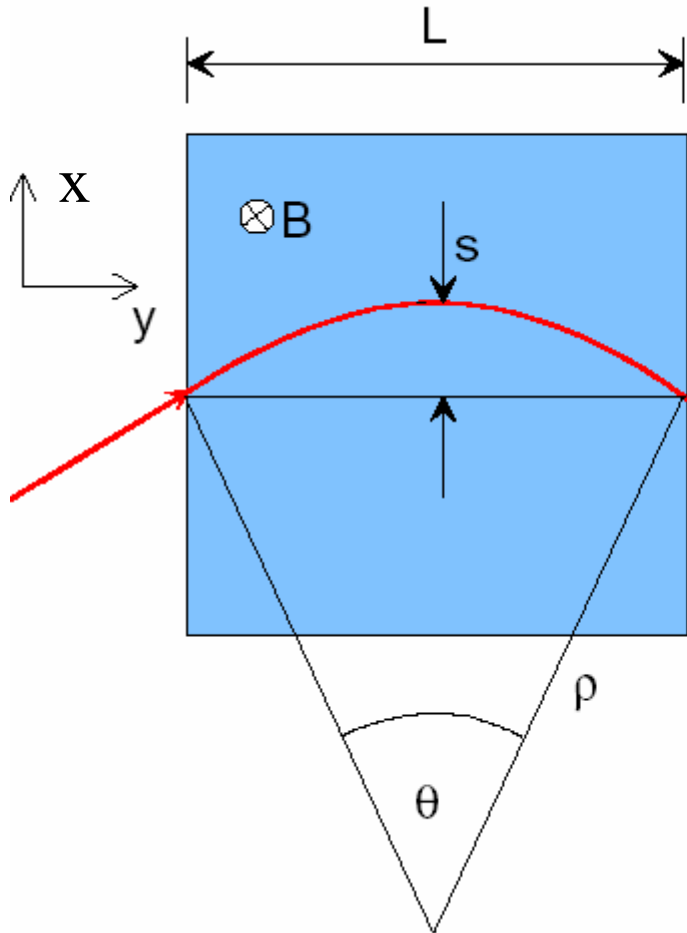
# Détecteurs gazeux

- Usages
- Principe de fonctionnement
- Exemples pratiques
- Avantages :
  - Peuvent être construits en grands volumes
  - Formes géométriques complexes possibles
  - Relativement bon marché

# Utilisation des détecteurs gazeux

- Suivi des traces chargées (« Tracking »)
- Détection des photons X, voire UV
- Mesures de perte d'énergie, identification de particules.

# Suivi des traces chargées



$$p_T = qB\rho$$

$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \quad (\text{T} \cdot \text{m})$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$\Delta p_T = p_T \sin \theta \approx 0.3L \cdot B$$

$$s = \rho(1 - \cos \theta/2) \approx \rho \frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{p_T}$$



# Formule pratique pour le dimensionnement

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(x) \cdot p_T}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{720 / (N + 4)} \quad \text{Pour } N \geq 10$$

ex:  $p_T = 1 \text{ GeV}/c$ ,  $L = 1\text{m}$ ,  $B = 1\text{T}$ ,  $\sigma(x) = 200\mu\text{m}$ ,  $N = 10$

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} \approx 0.5\%$$

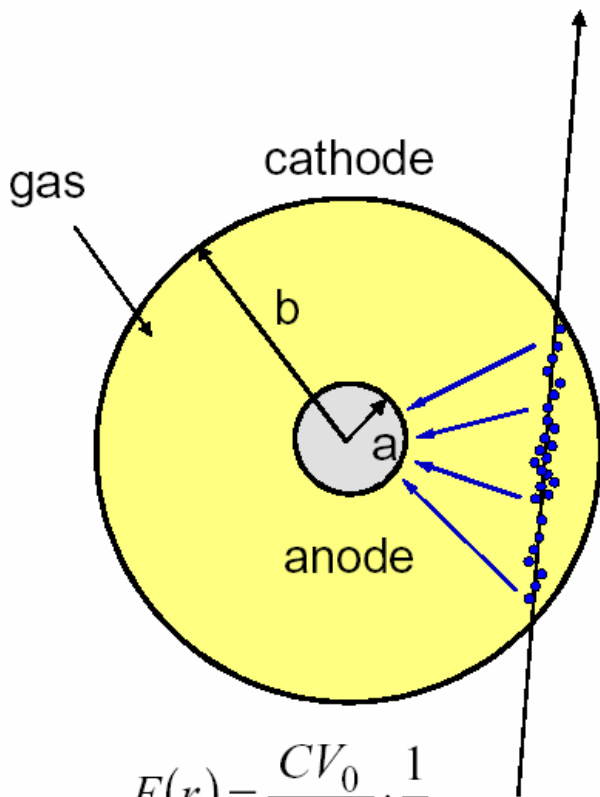
On a donc intérêt à :

- Réduire la résolution du détecteur
- Maximiser le champ magnétique
- Maximiser le nombre de points de mesure
- Maximiser la taille du détecteur

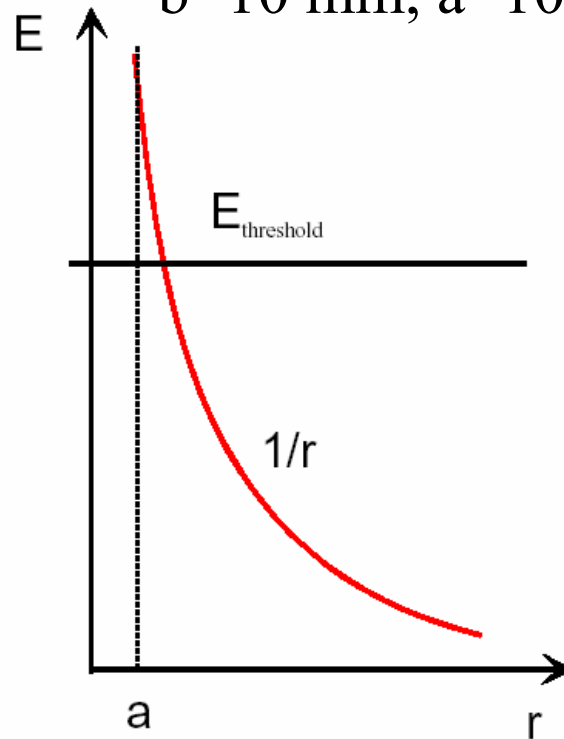
# Influence de la diffusion multiple

- La diffusion multiple contribue à  $\sigma(x)$
- Il faut la garder aussi faible que possible
  - Dégradation de la résolution
  - Complexe à prendre en compte (queues non gaussiennes)
- Les détecteurs gazeux sont bien adaptés de ce point de vue.

# Principe de fonctionnement



Exemple typique  
 $b=10 \text{ mm}$ ,  $a=10 \mu$



Une particule ionise un gaz  
 L'ionisation est collectée, puis amplifiée par le détecteur, puis donne un signal électrique

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

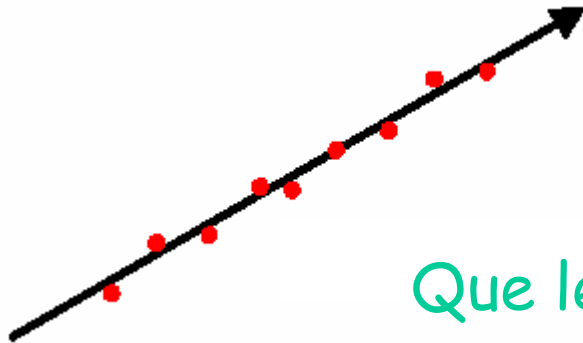
$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

$C = \text{capacitance / unit length}$

r	E
10 mm	14500 V/m
1 mm	145000 V/m
10 $\mu$	14.5 MV/m

# Ionisation primaire

Les électrons/ions ainsi créés ont une énergie cinétique de 10 à 100 eV



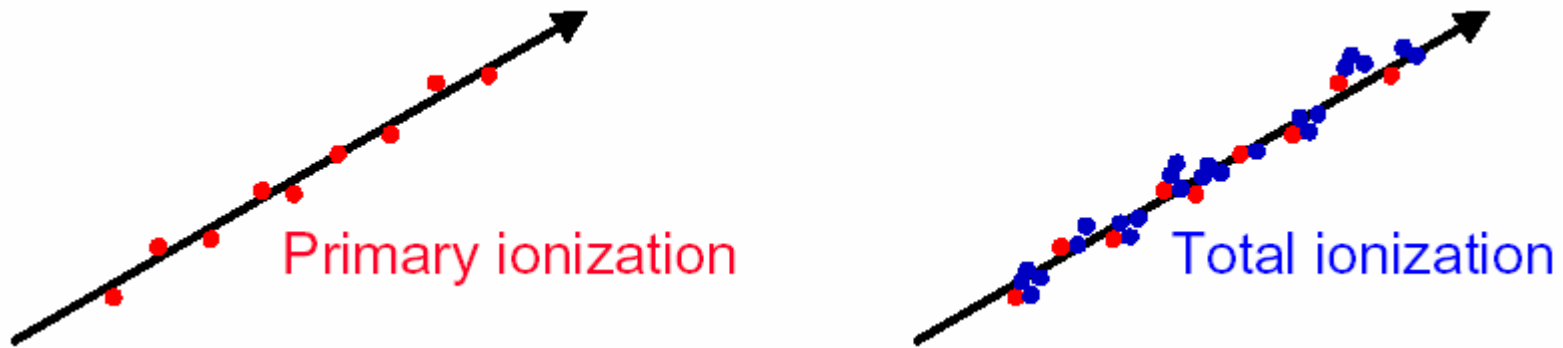
Que leur arrive-t-il ?



# Destin de l'ionisation primaire

- Recombinaison et capture ne sont pas souhaitables: ils font disparaître les électrons et ions ; cette disparition suit une loi exponentielle paramétrée par  $\eta$  (coefficient d'attachement)
- Composés chimiques particulièrement nuisibles :  $H_2O$ ,  $O_2$ , ethanol,  $SF_6$ ,  $CCl_4$ , les Fréons
- Il est donc important de contrôler soigneusement la composition du gaz.

# Ionisation secondaire



Les électrons/ions primaires ont une énergie cinétique suffisante pour générer d'autres électrons/ions, et répartissent progressivement leur énergie cinétique

$$n_{total} = \frac{\Delta E}{W_i} = \frac{\frac{dE}{dx} \Delta x}{W_i}$$

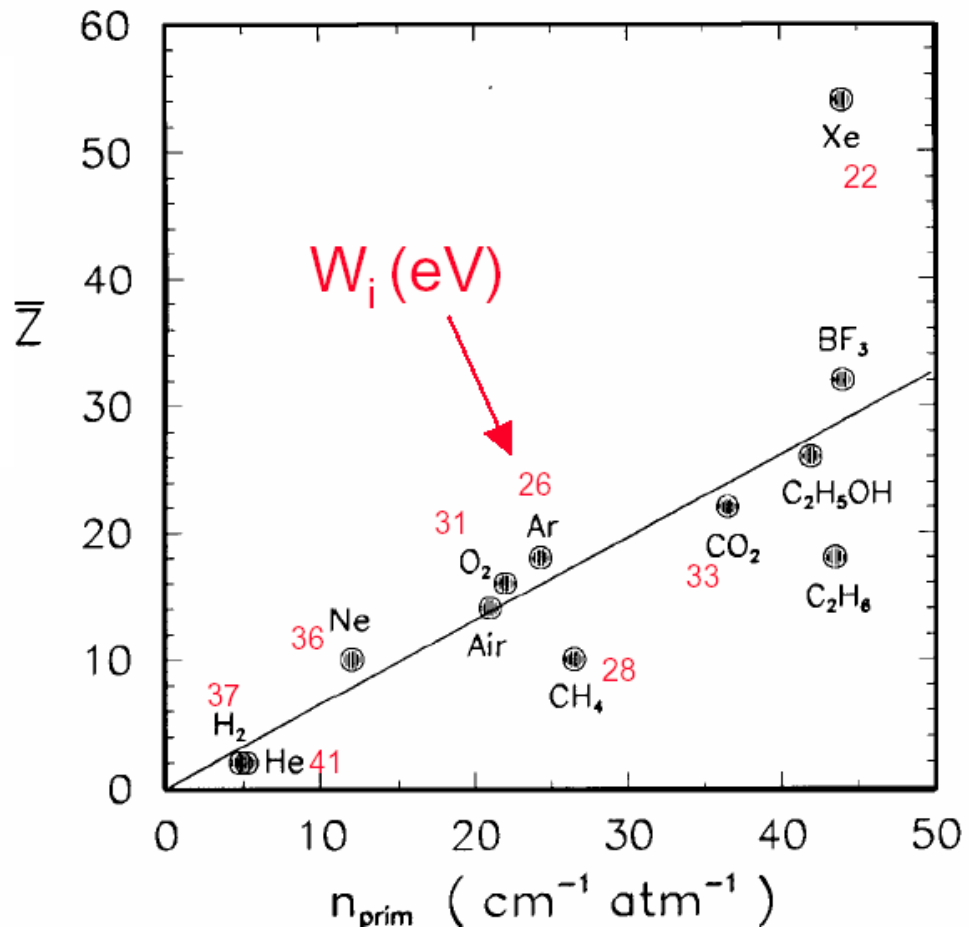
$$n_{total} \approx 3 \dots 4 \cdot n_{primary}$$

Nb total de paires électron/ion

$W_i$  = énergie nécessaire pour une paire

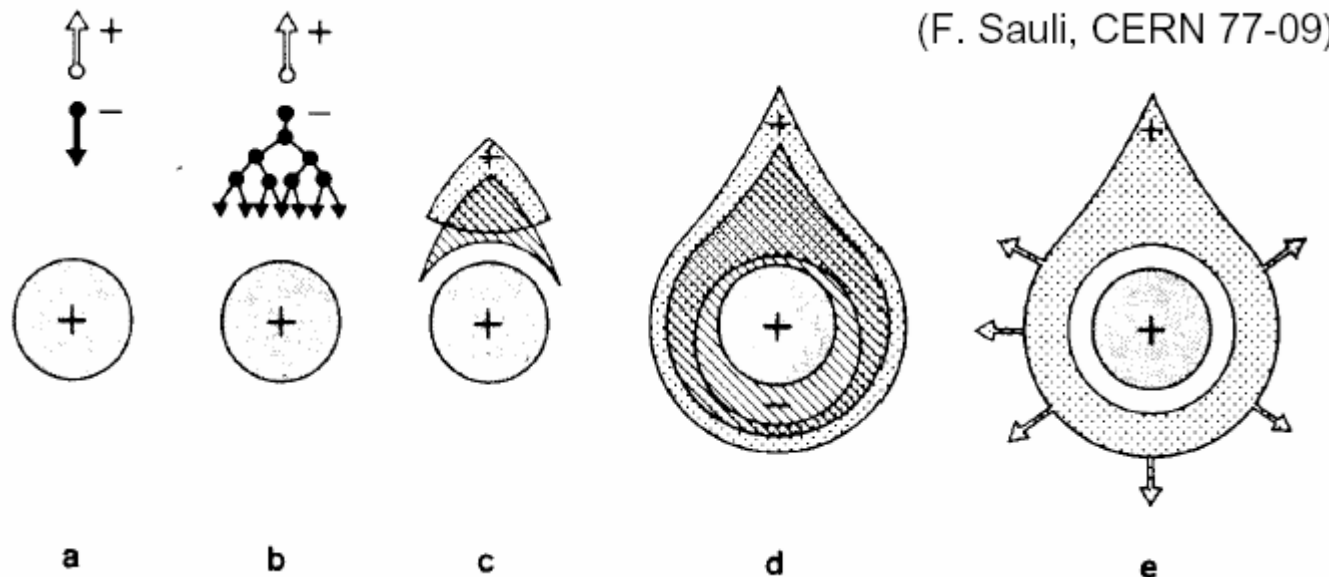
Nb de paires primaires dans des gaz couramment utilisés

(Lohse and Witzeling, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific, 1992)



# Amplification

- Il est indispensable d'amplifier les qq dizaines à qq centaines d'électrons ainsi obtenues
- Les électrons dérivent vers le fil central sous l'effet du champ électrique
- Près du fil (à quelques rayons du fil), accélération importante  $\Rightarrow$  ionisation par choc, et le processus s'auto-entretient
- Echelle de temps de l'amplification : quelques ns





# Avalanches simulées



Fig. 5 Two dimensional display of a simulated drift process of one electron from starting point to anode wire surface.

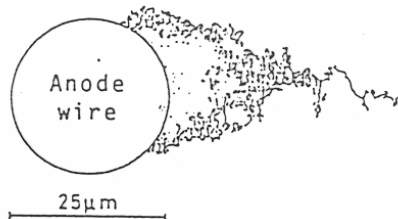


Fig. 6 Two dimensional display of a simulated electron avalanche.

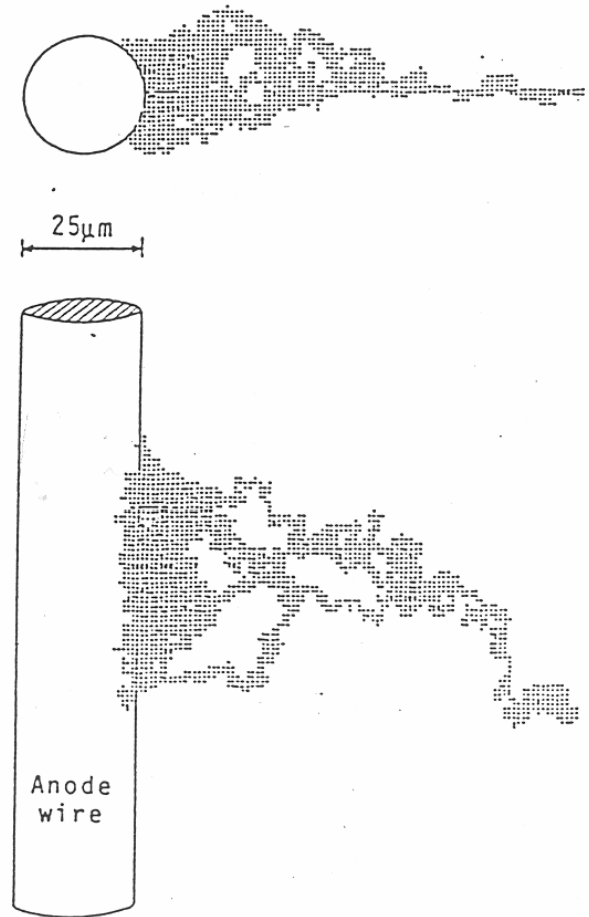


Fig. 7 Two dimensional displays of a simulated electron avalanche. Shading shows the density of electrons in the avalanche.

# Caractérisation de l'amplification

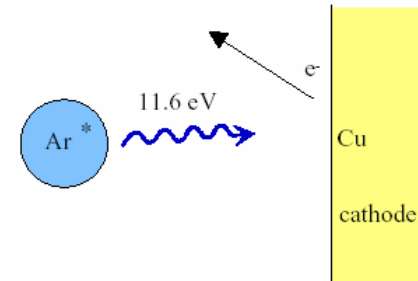
$$n = n_0 e^{\alpha(E)x} \quad \text{or} \quad n = n_0 e^{\alpha(r)x} \quad \alpha = \text{premier coefficient de Townsend}$$

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} \quad \lambda = \text{libre parcours moyen des électrons}$$

$$M = \frac{n}{n_0} = \exp \left[ \int_a^{r_C} \alpha(r) dr \right] \quad \text{Gain} \quad M \approx ke^{CV_0}$$

# Choix du gaz

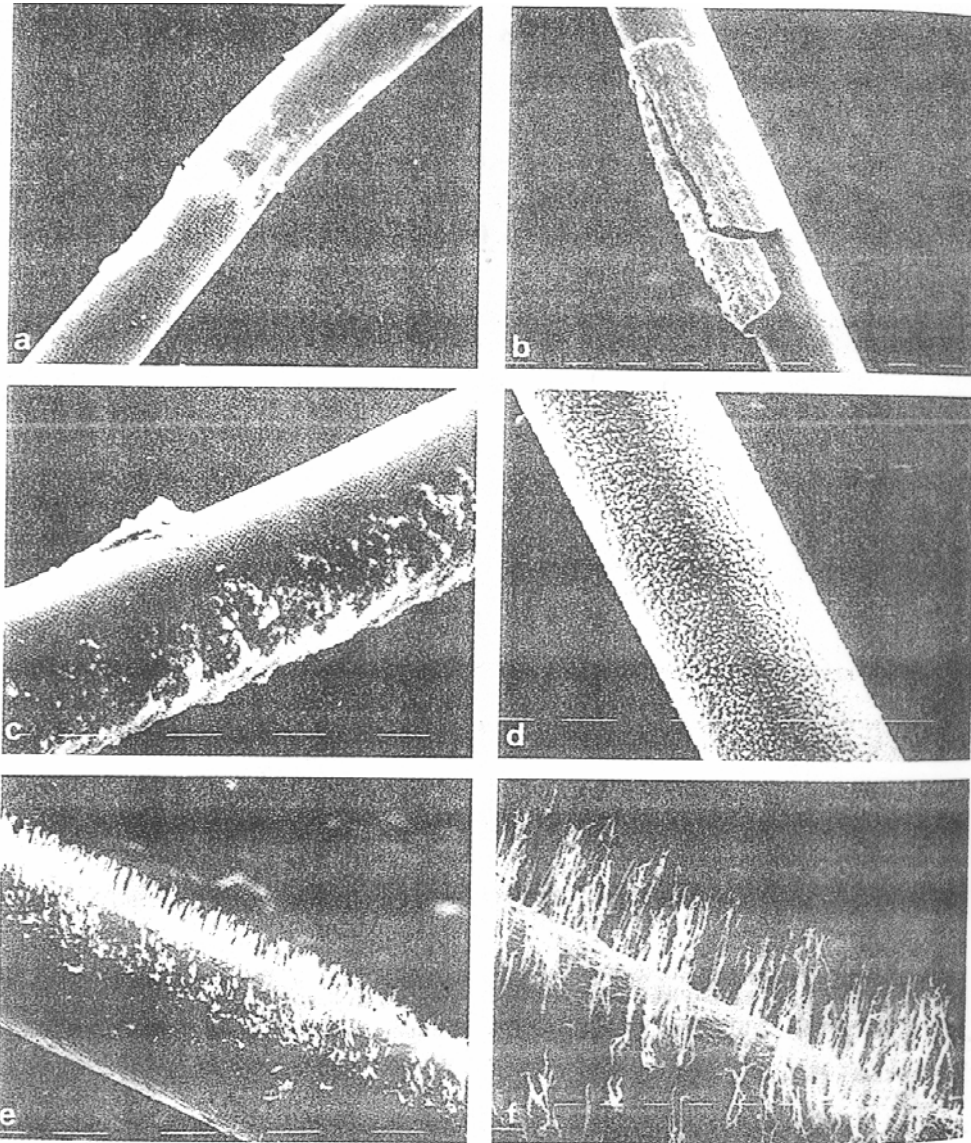
- Il faut des gaz dans lesquels l'énergie sera dissipée principalement par ionisation  $\Rightarrow$  gaz rares, qui n'ont pas d'états vibrationnels ou rotationnels
- Contrepartie : un atome excité a une forte probabilité de se désexciter par émission de photons UV (11.6 eV pour l'Argon)
- Ces photons ont une forte probabilité d'arracher un électron dans le milieu environnant (parois du détecteur)
- Le détecteur risque d'être en avalanche permanente.



# Le quencher

- Gaz polyatomique, ayant des états vibrationnels et rotationnels, sur lesquels peut se répartir l'énergie des photons UV, par collision et dissociation.
- Exemples de quenchers souvent utilisés: méthane, isobutane, éthanol.
- « Gaz magique » : 70% Ar, isobutane 29.6%, Fréon 0.4% . Permet des gains élevés.
- Beaucoup de mélanges ont été testés... Voir F. Sauli, Principles of operation of multiwire proportional chambers, CERN 77-09

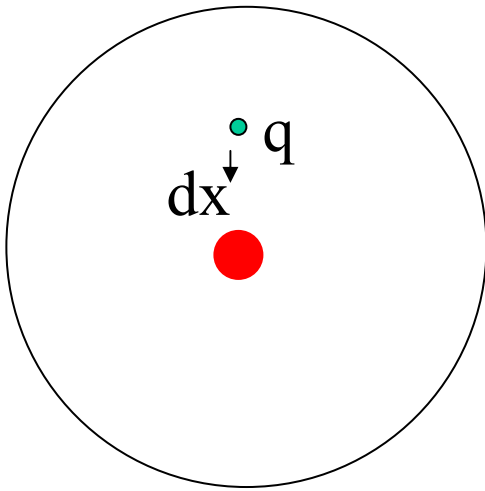
# Que devient le quencher après usage ?



Les « débris » du quencher se déposent et polymérisent sur le fil.

Dépôts en général très isolants. Ils finissent par perturber le fonctionnement normal du détecteur.

# Génération du signal



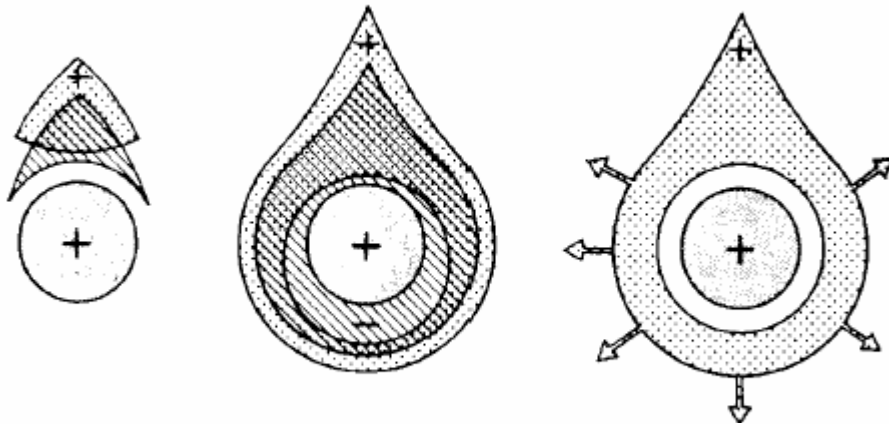
Charge induite sur le fil central par le déplacement  $dx$  de la charge électrique  $q$  :  $qE(x) dx = V_0 dQ$

Signal cherché

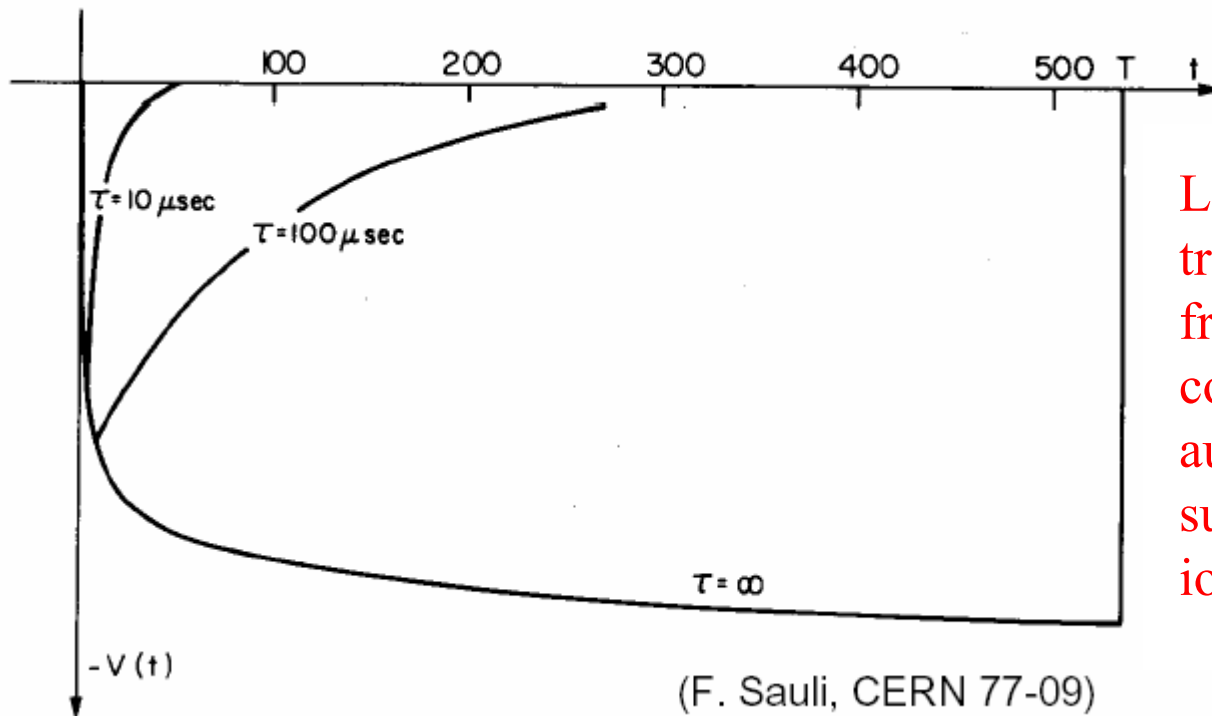
$$Q = \int dQ = \int_{x_{debut}}^{x_{fin}} \frac{q}{V_0} E(x) dx = q \frac{V(x_{debut}) - V(x_{fin})}{V_0}$$

# Génération du signal

(F. Sauli, CERN 77-09)



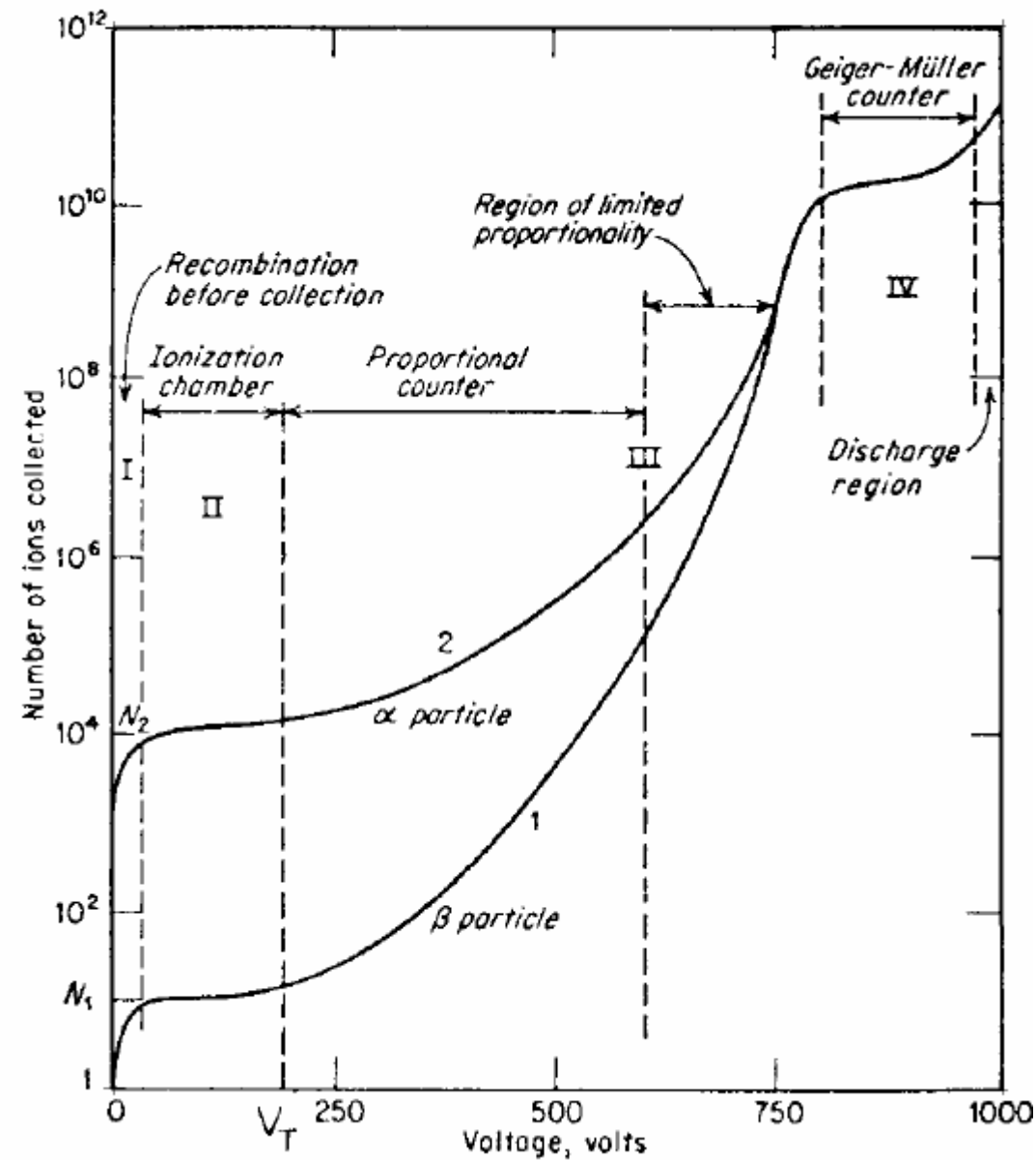
Induction de charges sur le fil par la dérive des électrons et des ions



Les électrons ne traversent qu'une faible fraction du détecteur : contribution faible (qq%) au signal, qui provient surtout de la dérive des ions

(F. Sauli, CERN 77-09)

# Modes de fonctionnement



I: chambre à ionisation. Collection sans amplification

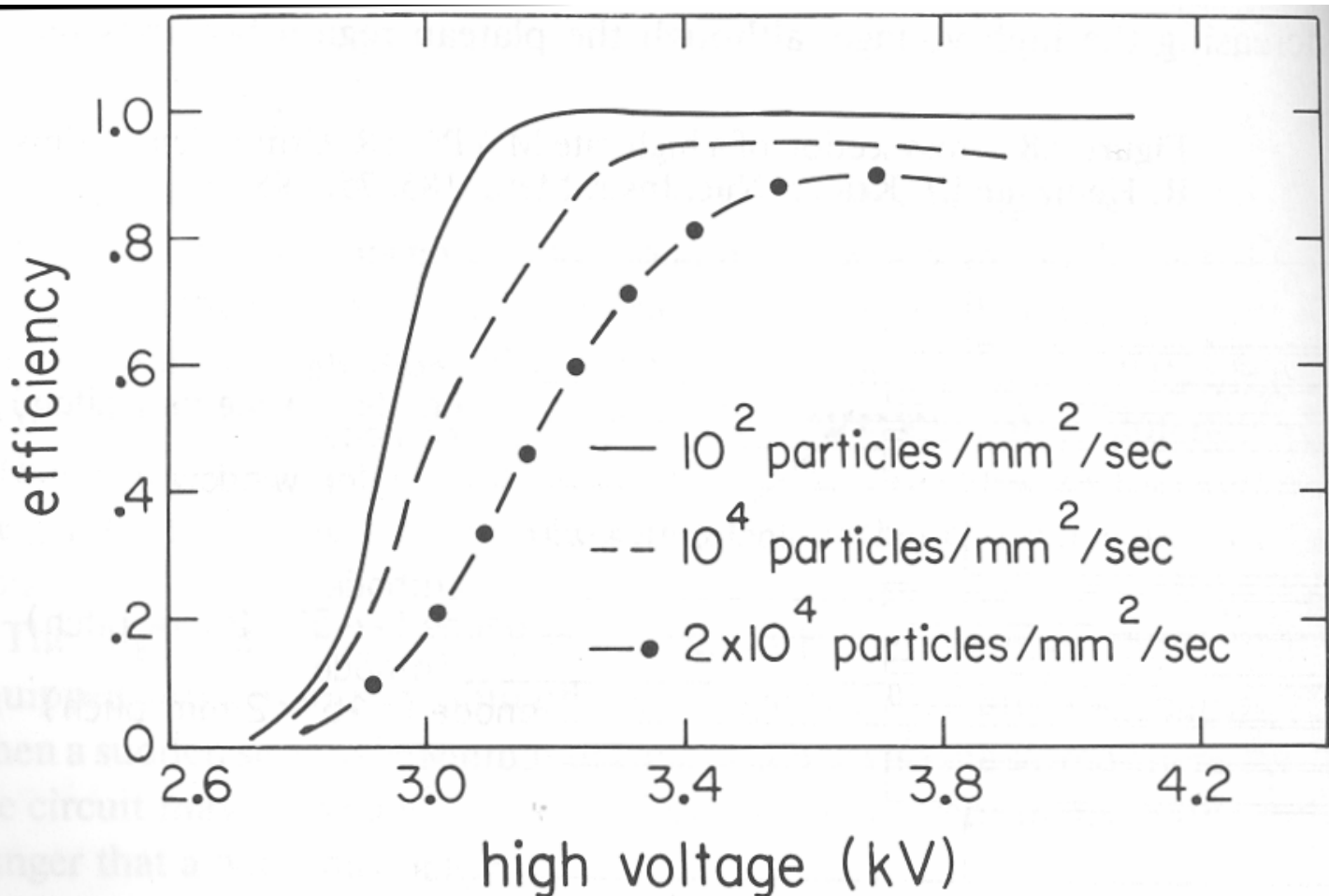
II: mode proportionnel, le signal est amplifié et proportionnel à l'ionisation déposée. Gain de  $10^4$  à  $10^5$

III: mode streamer. Avalanches secondaires déclenchées par l'avalanche principale. Fort quenching nécessaire, ou HT pulsée. Gain de l'ordre de  $10^{10}$ .

IV mode Geiger. Avalanches dans tout le détecteur



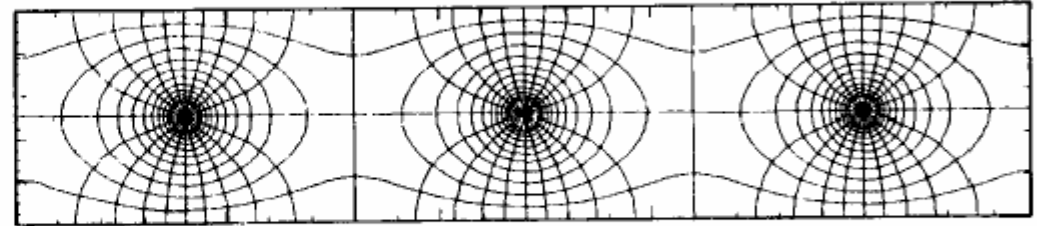
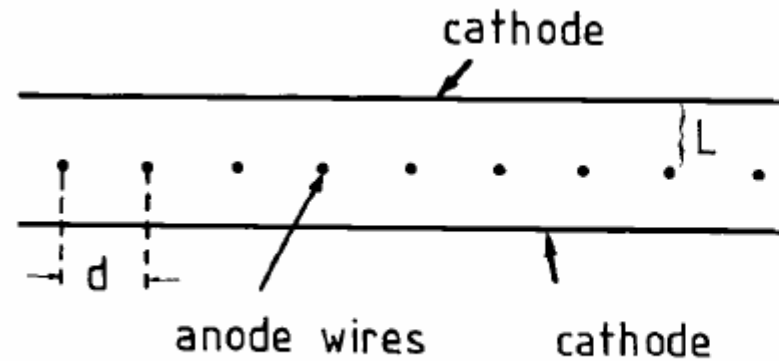
# Efficacité de détection



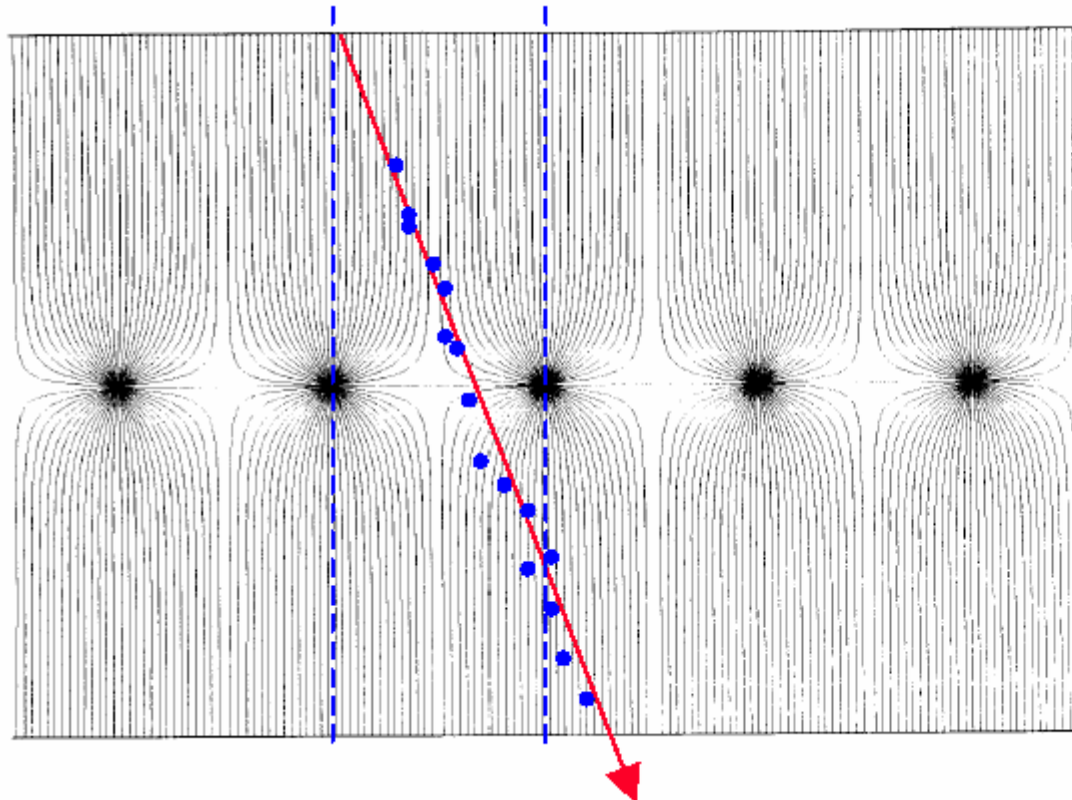
Il est facile d'avoir une efficacité de 100%

A flux élevé, les ions n'ont plus le temps de s'évacuer entre deux particules

# Chambres proportionnelles



field lines and equipotentials around anode wires



Paramètres typiques :  
 $L=8$  mm,  $d=2$  mm,  
Diamètre des fils : 20-30  $\mu$   
En général,  $L/d \approx 3-4$

Résolution spatiale :  
 $\sigma = d/\sqrt{12} (\approx 600\mu)$

# Comment améliorer la résolution spatiale ?

- Solution évidente : rapprocher les fils !
- Ca ne marche pas... Les forces électrostatiques exercées sur les fils deviennent supérieures à la résistance mécanique de ceux-ci pour  $d \approx 1$  mm...
- Influence des tolérances mécaniques sur les lignes de champ, et donc sur le gain.
- Règle :  $d/L \geq 1.5 \cdot 10^{-3} V(\text{kV}) \sqrt{20g/T}$  (en grammes))
- Fils en général en tungstène, éventuellement doré, T de l'ordre de 1 N. La structure d'une chambre de 1m doit donc résister à environ 50 N.

# Structure mécanique d'une chambre

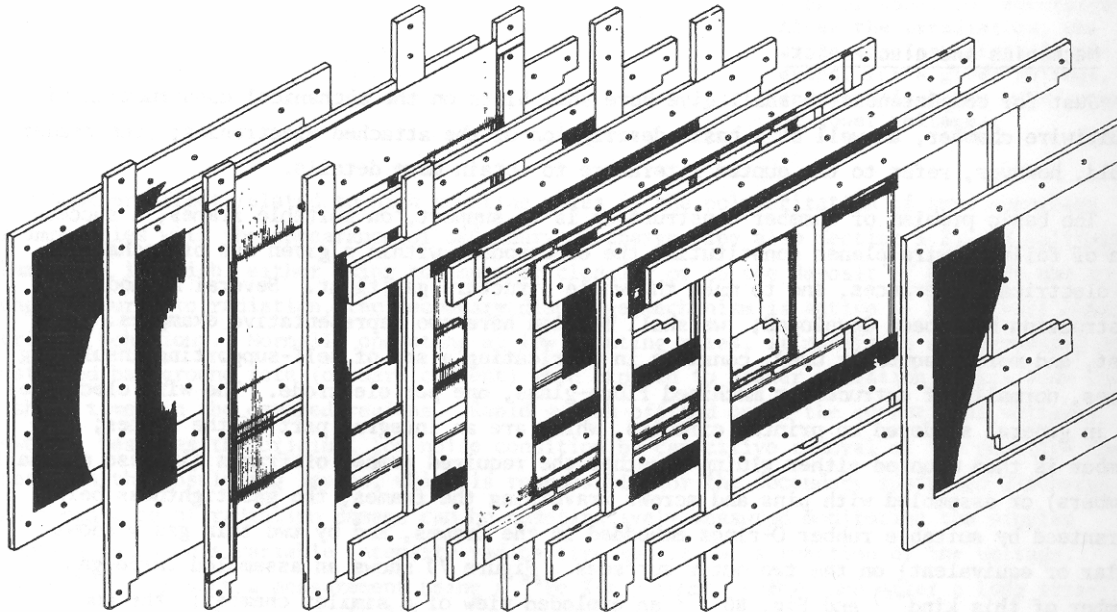
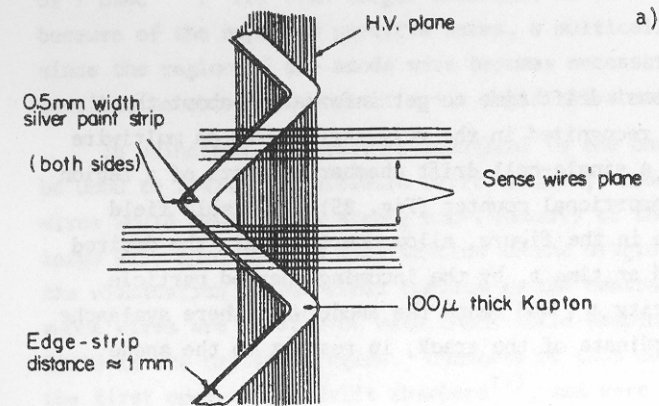
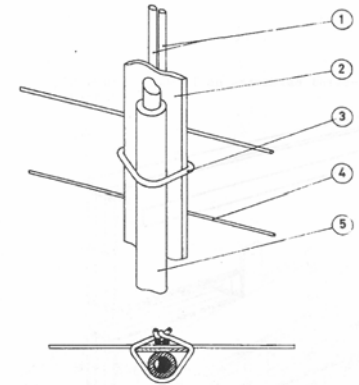
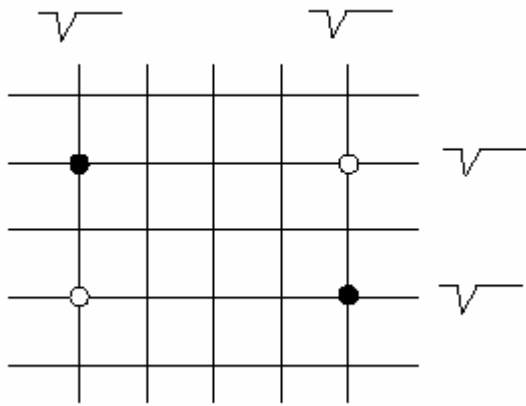


Fig. 80 Exploded view of a 2-coordinates multiwire chamber, showing the number and the complexity of the required parts<sup>55</sup>).



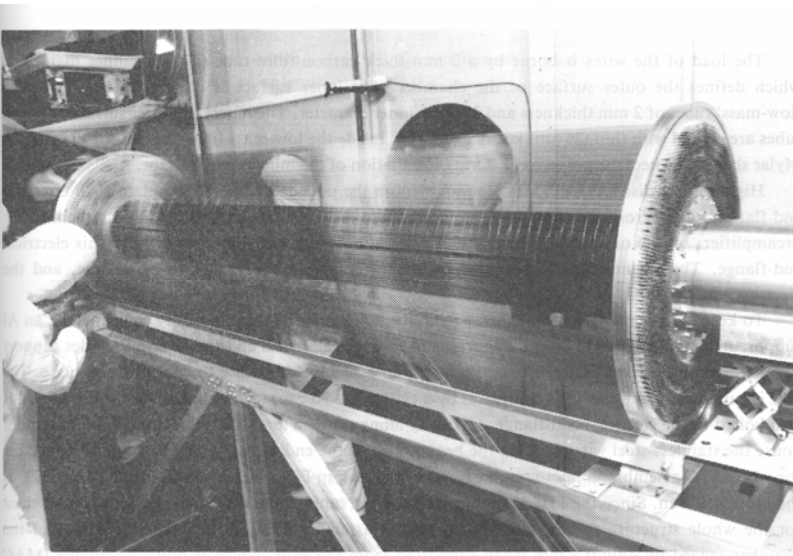
Les espaceurs contrecarrent les effets des forces électrostatiques, mais créent des zones mortes. Optimisation à trouver au cas par cas.

# Obtention de plusieurs coordonnées



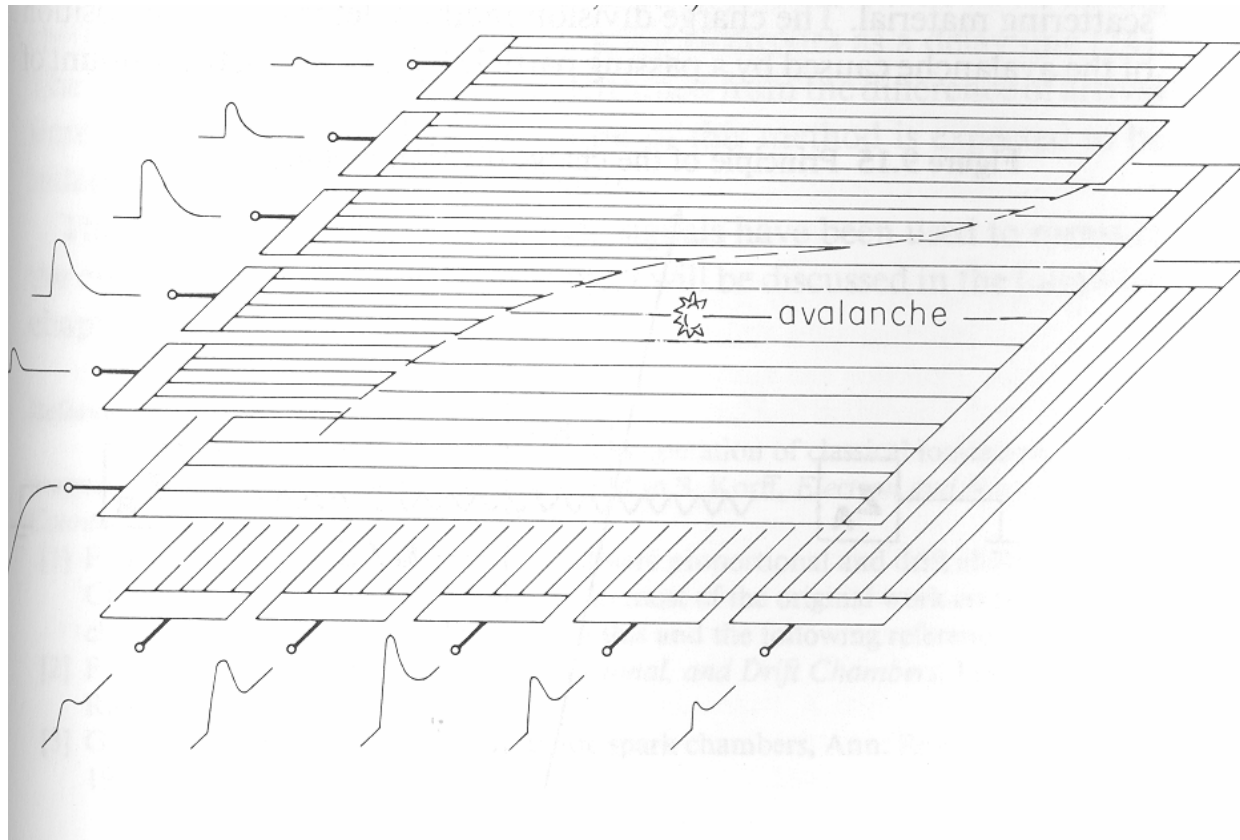
Solution simple : deux plans de fils croisés à  $90^\circ$ . Mais deux fils touchés donnent quatre intersections possibles (ambiguïtés). Viable Uniquement si la multiplicité n'est pas trop grande (risque d'explosion combinatoire)

Amélioration : fils « stéréo » (croisements à petit angle)



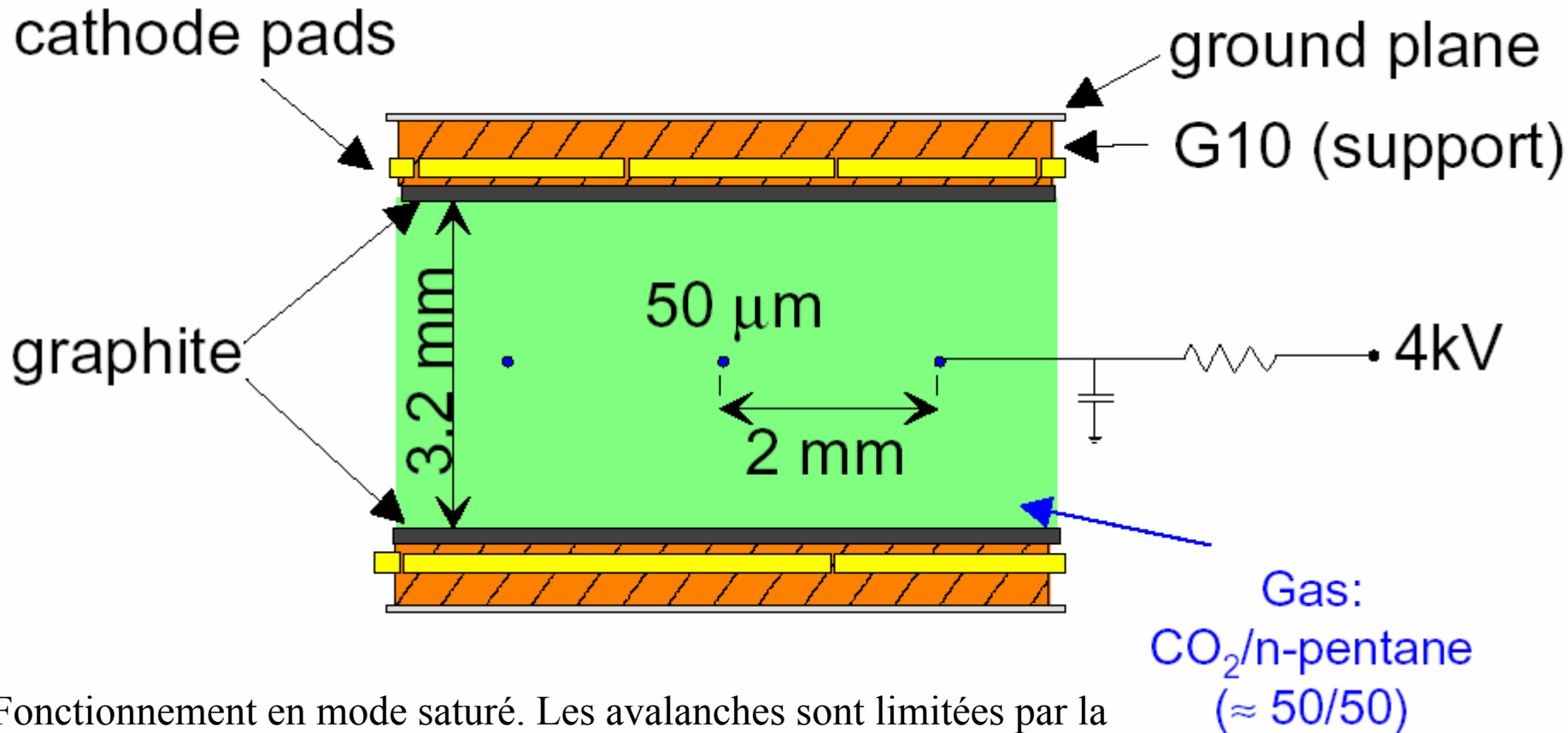
Utilisation du temps de propagation (ITC ALEPH). Résolution  $\approx 3$  cm (100 ps)

# Autre solution possible



On divise le plan de cathodes en rubans lus individuellement

# Quelques descendants : TGC

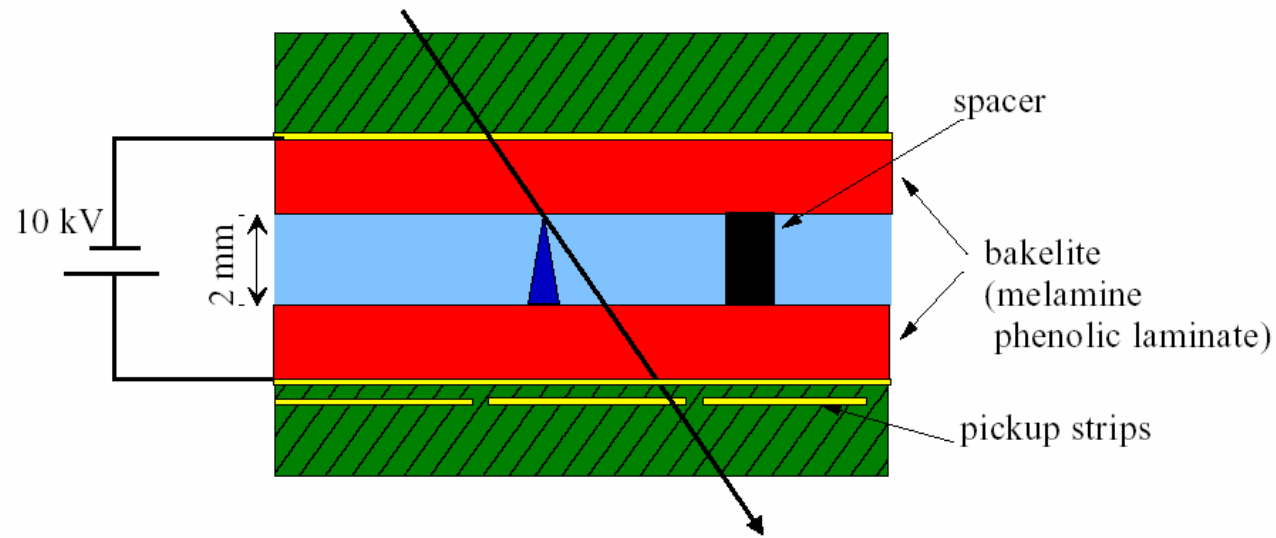


Fonctionnement en mode saturé. Les avalanches sont limitées par la résistivité du plan de graphite ( $40 \text{ k}\Omega/\square$ )

Signaux rapides (temps de montée : 2 ns, gain  $10^6$ ). Conception robuste

Seront utilisées dans ATLAS (déclenchement muon end-cap)

# Quelques descendants : RPC

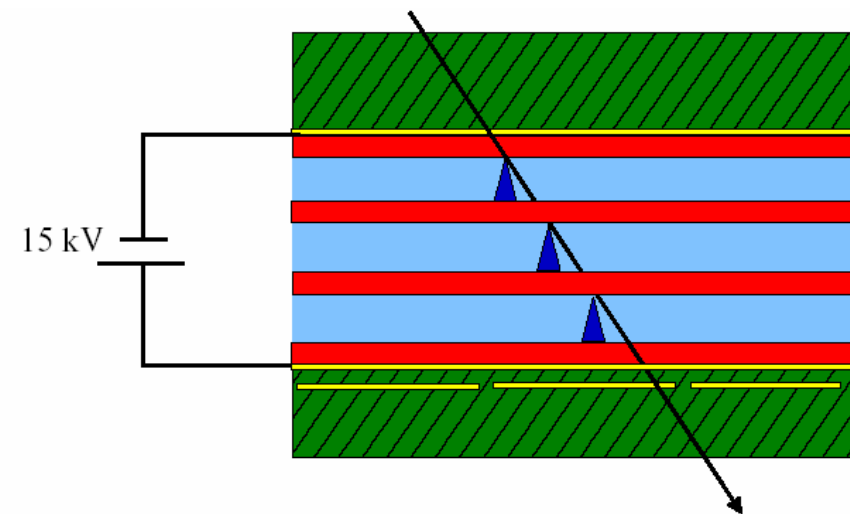


Plus de fils

Résolution en temps de 1 à 2 ns

Peut être encore améliorée en superposant plusieurs couches

Gas:  $C_2F_4H_2$ ,  $(C_2F_5H)$  + few % isobutane



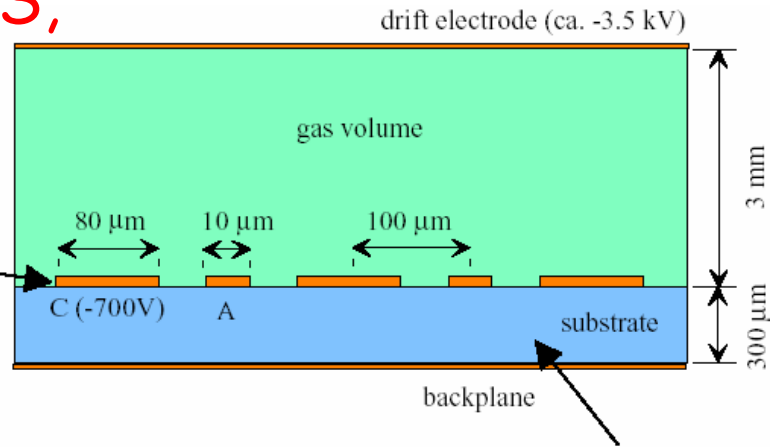
Mais fonctionnement délicat, car proche du mode streamer



# MSGC

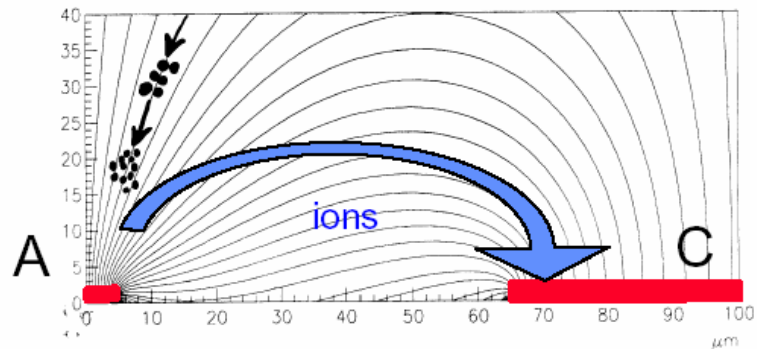
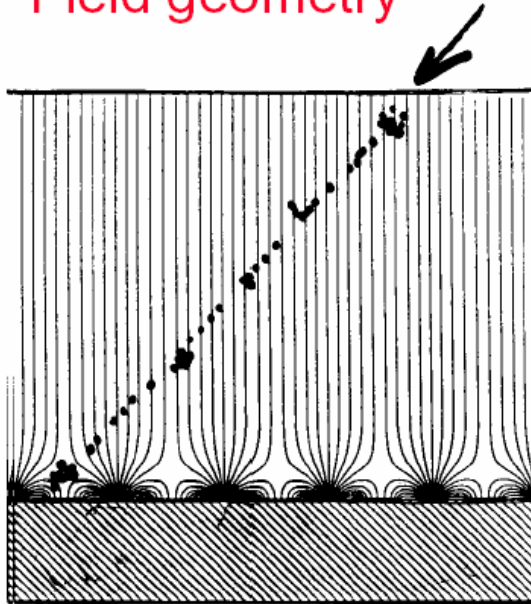
Solution considérée par CMS,  
mais pbs de vieillissement  
En principe résolus

Gold strips  
+ Cr underlayer



Glass DESAG AF45 + S8900  
semiconducting glass coating,  
 $\rho=10^{16} \Omega/\square$

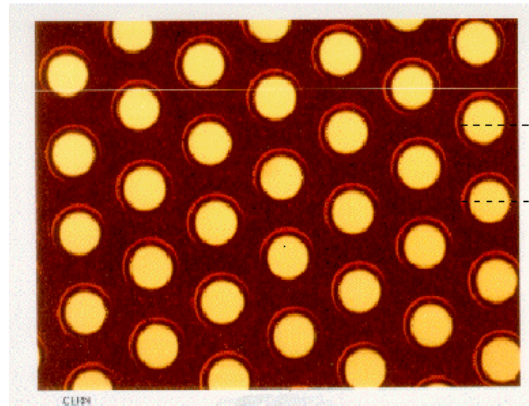
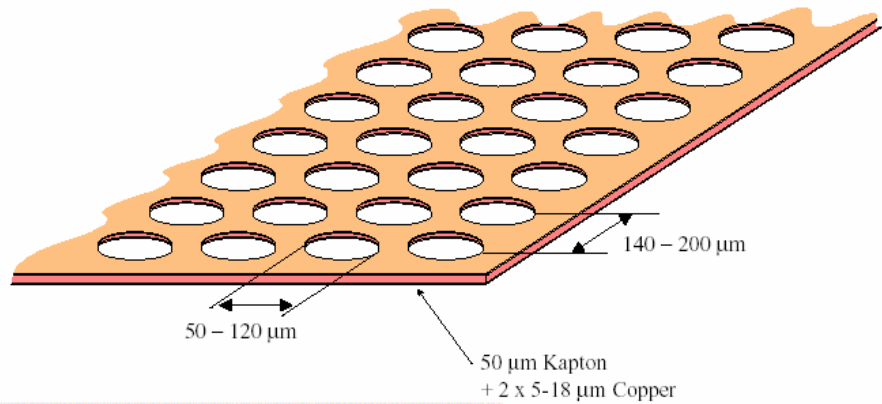
Field geometry



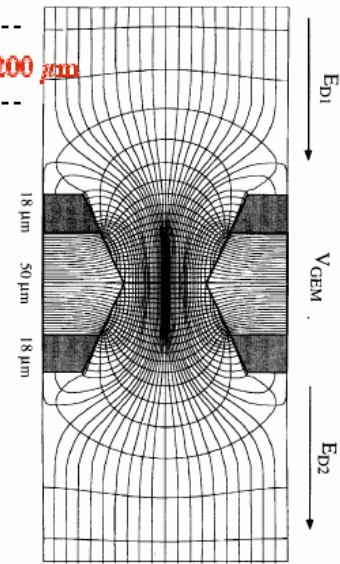
Fast ion evacuation → high rate capability 73  
 $\approx 10^6 /(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$

# GEM

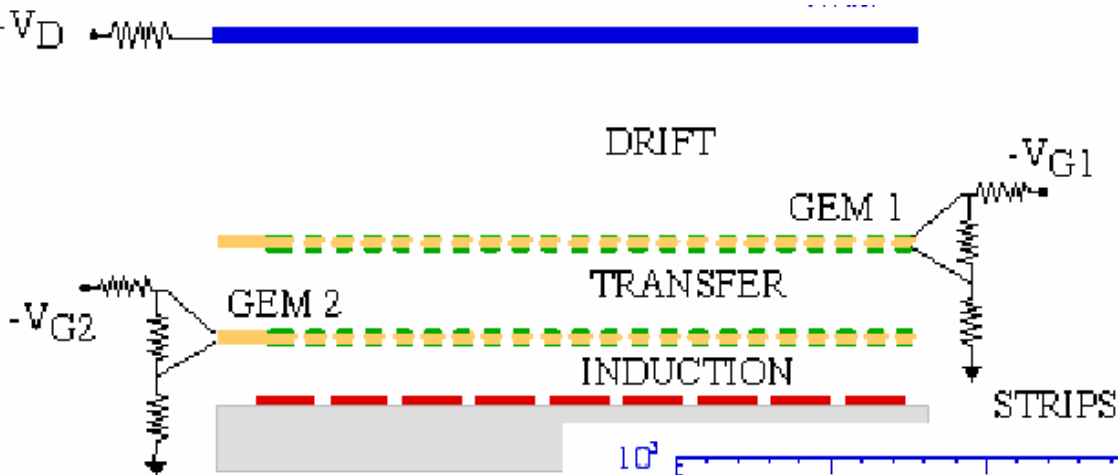
(R. Bouclier et al., NIM A 396 (1997) 50)



Micro photo of a GEM foil

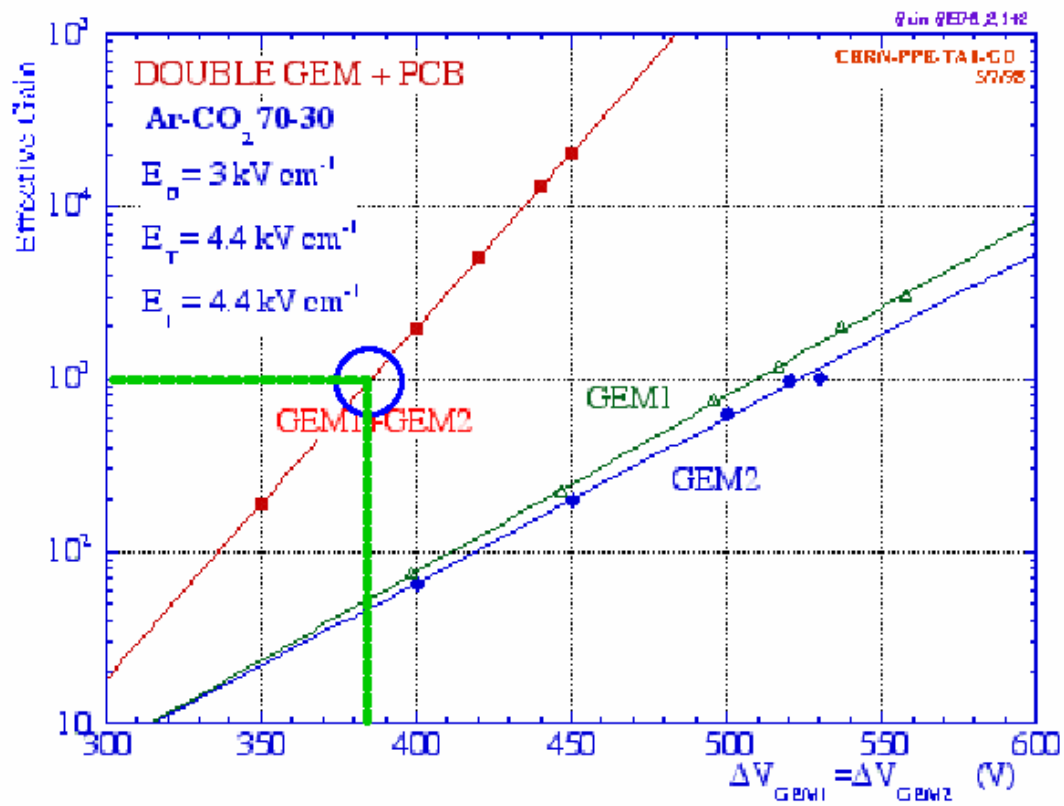


# GEM

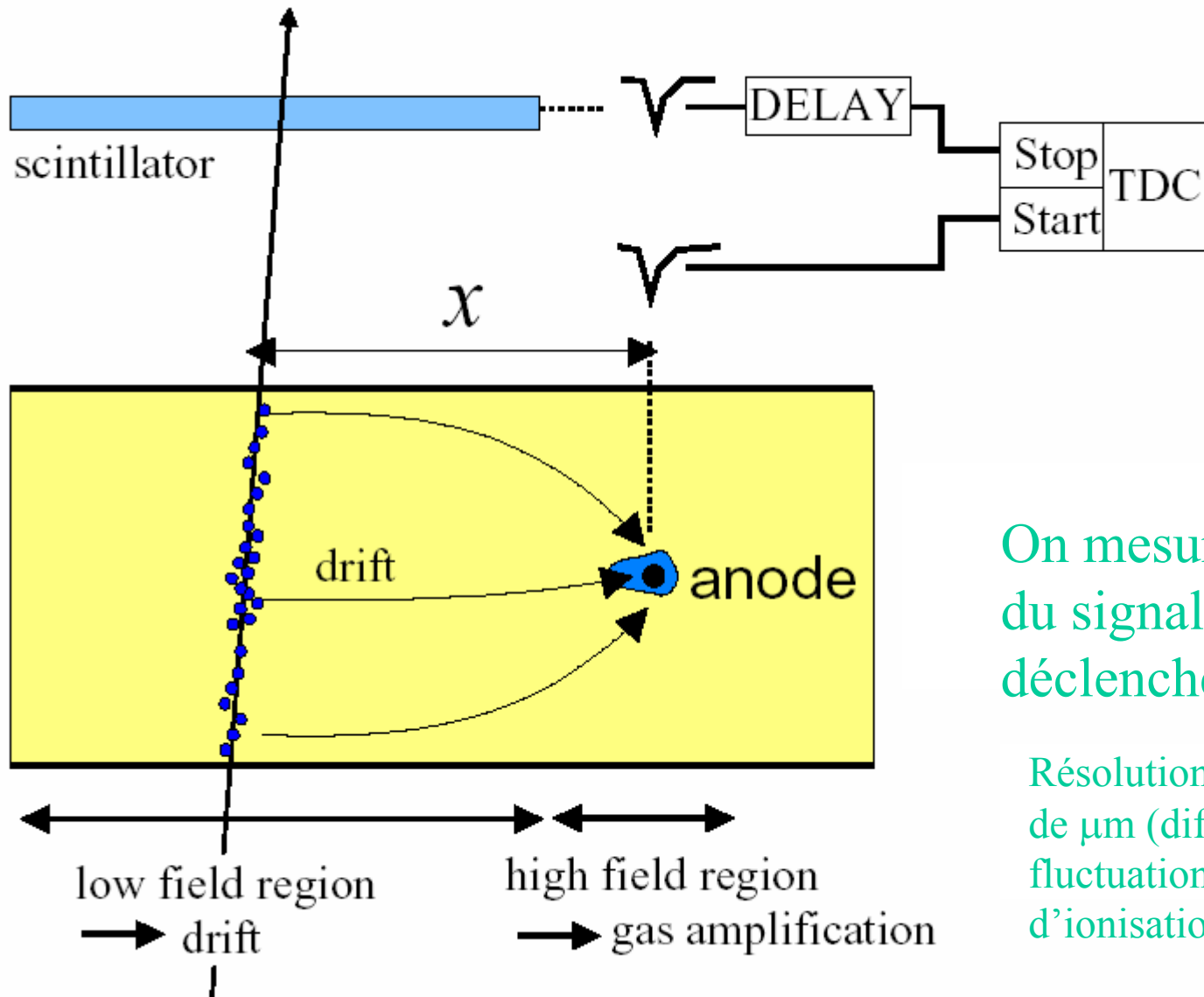


Double GEM  
+ readout pads

- Same gain at lower voltage
- Less discharges



# Chambres à dérivation



On mesure le temps d'arrivée du signal par rapport à un déclenchement externe

Résolution de qq dizaines de  $\mu\text{m}$  (diffusion, électronique, fluctuations de trajectoire, d'ionisation)

# Intérêt des chambres à dérives

- Il faut moins de fils par unité de longueur
  - Gain sur le coût
  - Structure mécanique moins rigide qu'une MWPC
- Volumes énormes possibles
- Mais :
  - Elles doivent être déclenchées
  - Électronique relativement plus complexe qu'une MWPC
  - Détecteurs lents (temps de dérives)

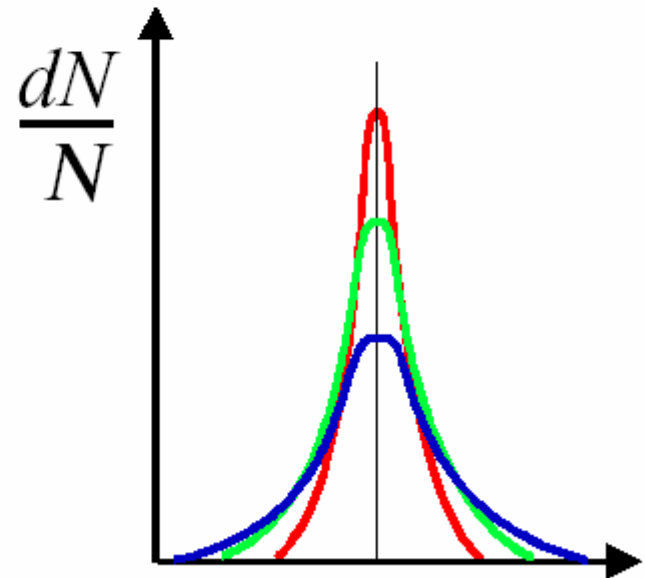
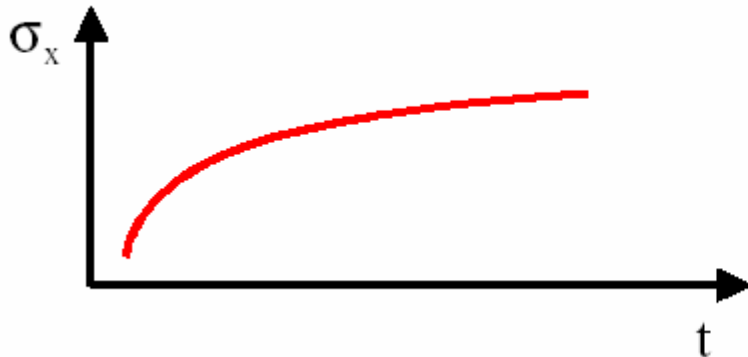
# Diffusion et dérive

- En l'absence de champ externe (E ou B), les électrons diffusent sous l'effet des collisions avec les atomes :

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-(x^2/4Dt)} dx$$

$D$ : diffusion coefficient

$$\sigma_x(t) = \sqrt{2Dt} \quad \text{or} \quad D = \frac{\sigma_x^2(t)}{2t}$$

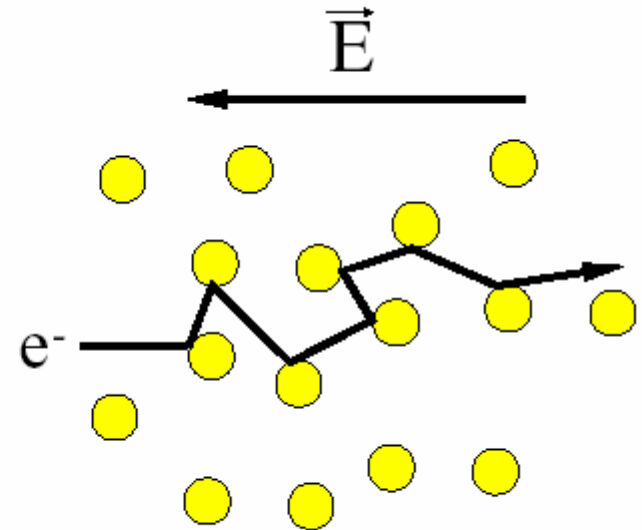


# Diffusion et dérivation

- En présence d'un champ électrique

Les électrons se déplacent à une **vitesse moyenne constante**

$$\vec{v}_D = \mu \vec{E} \quad \mu = \frac{e\tau}{m} \text{ (mobility)}$$



# Tout cela se mesure et se modélise

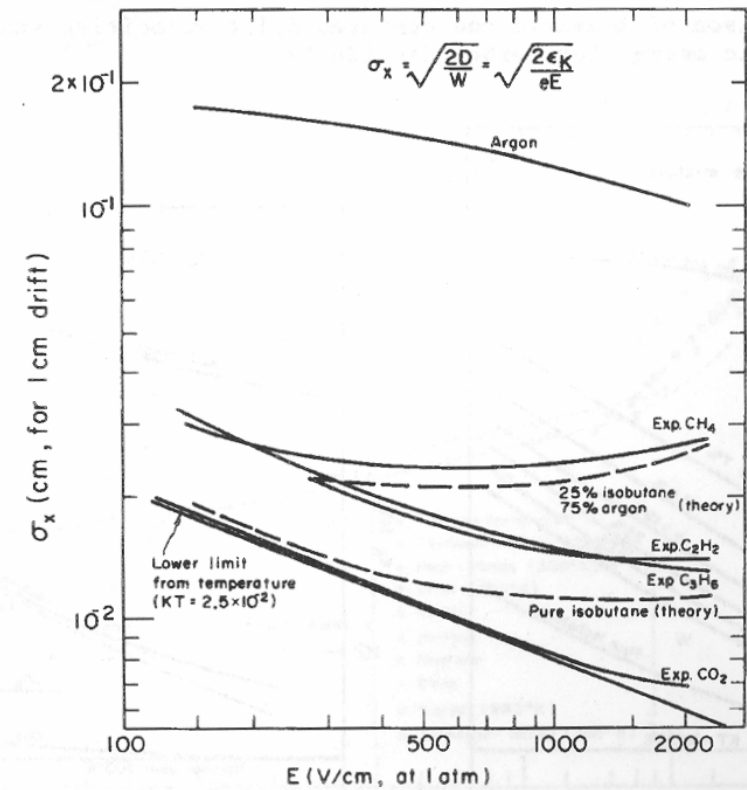


Fig. 35 Computed and experimental dependence of the standard deviation of electron diffusion from the electric field for 1 cm drift, in several gases at normal conditions<sup>25)</sup>

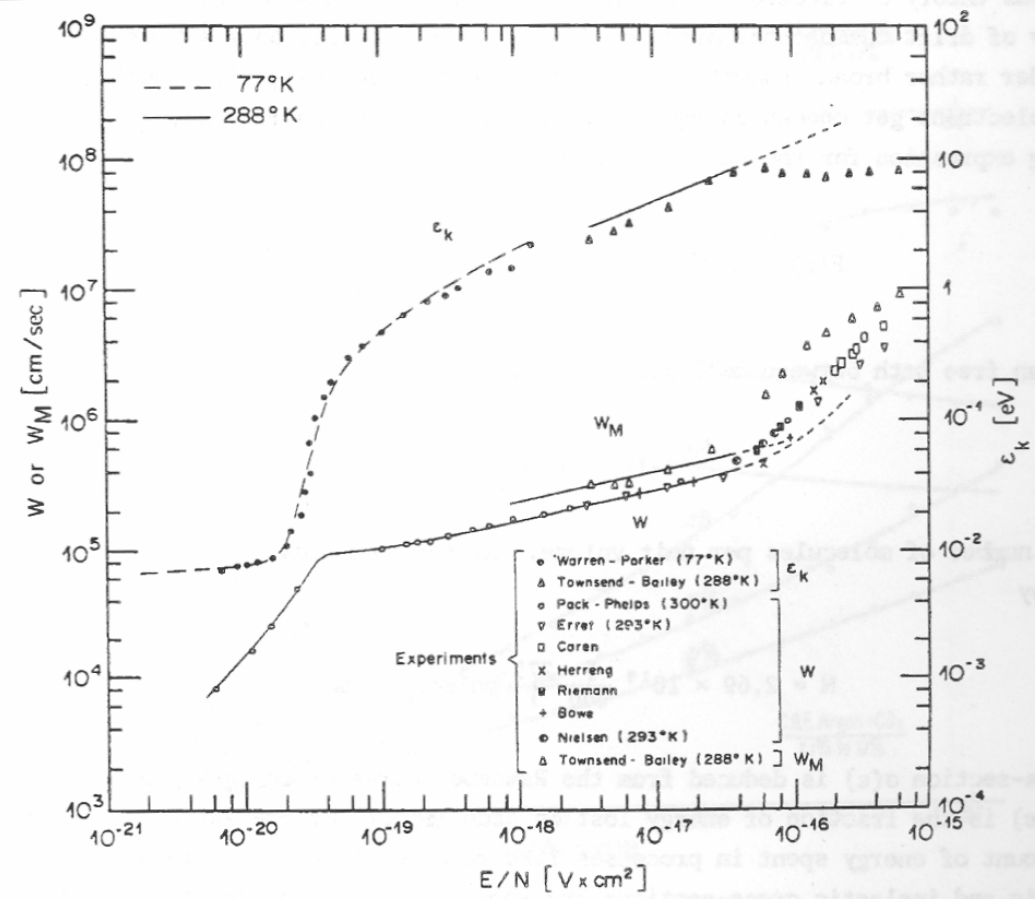


Fig. 31 Comparison of measured and computed drift velocities and characteristic energy for argon<sup>26)</sup>

Ordre de grandeur : dérive de 1m  $\Rightarrow$   $\sigma \approx 1$  cm

Vitesse de dérive : qq cm/10 ns



# Diffusion et dérivation

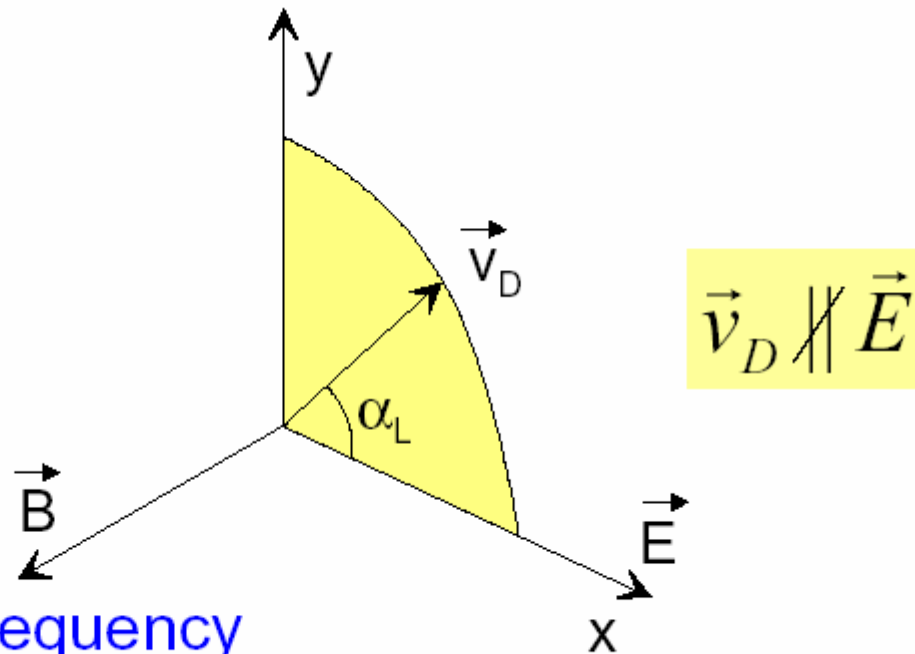
- En présence d'un champ électrique et d'un champ magnétique

$$\vec{E} \perp \vec{B}$$

$$\tan \alpha_L = \omega \tau$$

$\alpha_L$ : Lorentz angle

$$\omega = \frac{e\vec{B}}{m} \quad \text{cyclotron frequency}$$



# Diffusion et dérive

- En présence d'un champ électrique et d'un champ magnétique

La diffusion longitudinale (dans la direction de  $B$ ) n'est pas modifiée.

Dans le plan transverse, les électrons tournent autour des lignes de champ  $B$ .

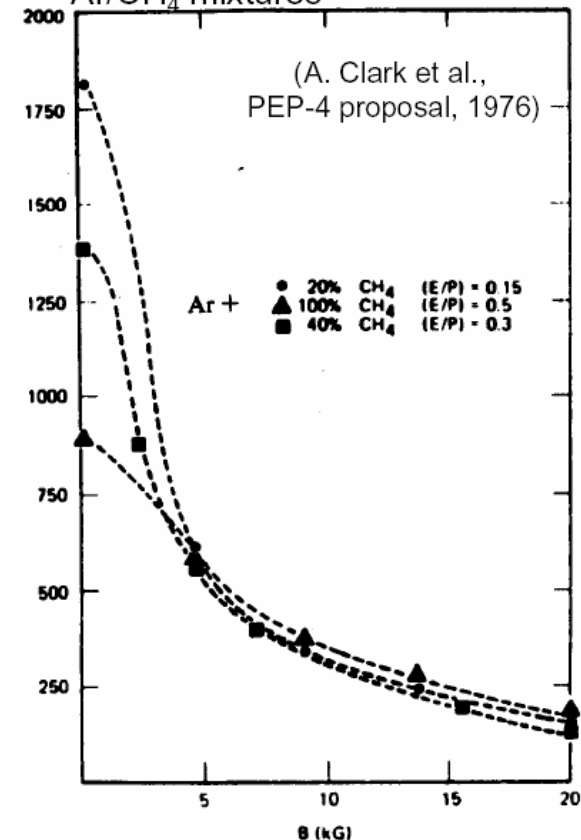
Le coefficient de diffusion en est réduit.

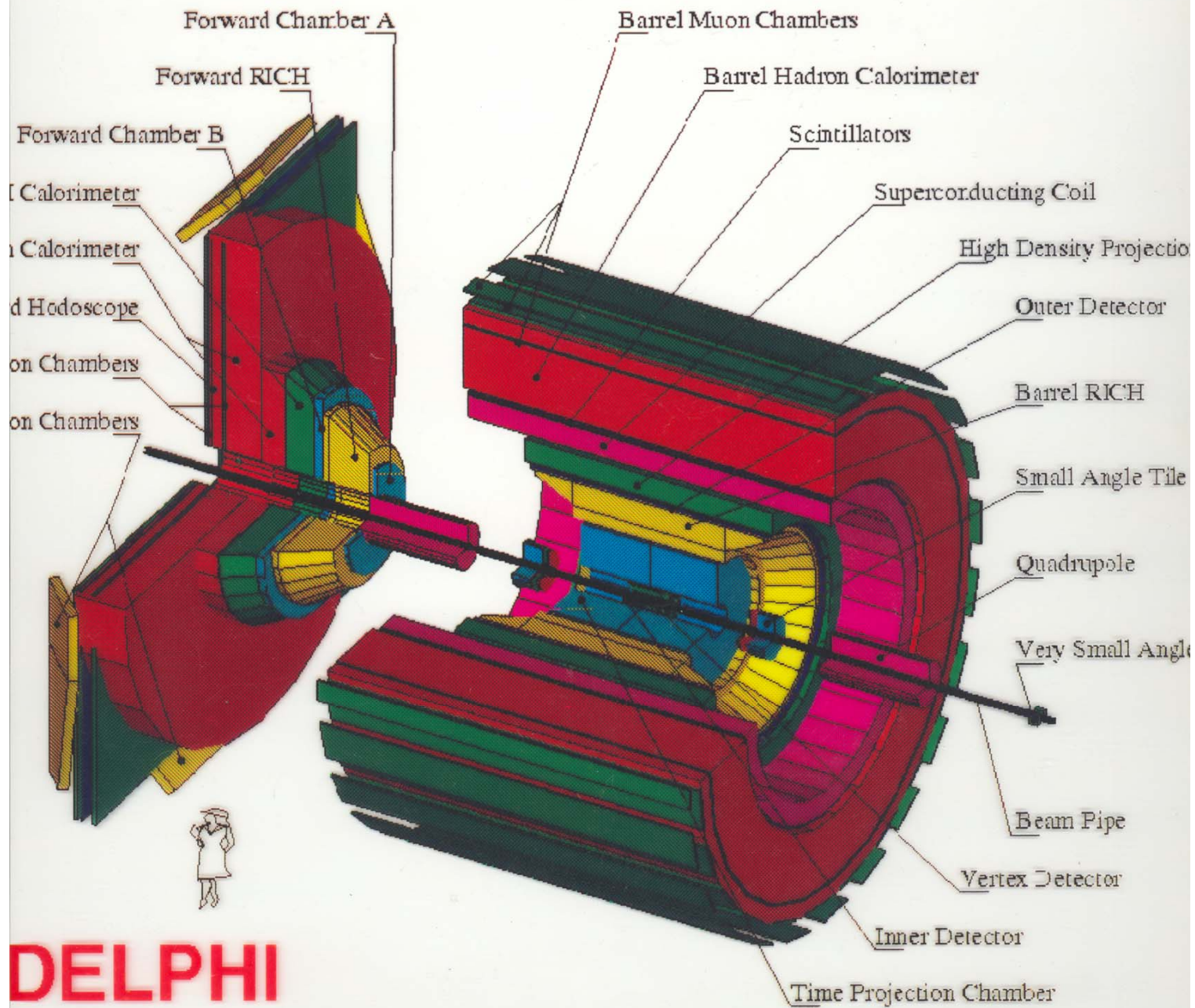
$$\vec{E} \parallel \vec{B}$$

$$D_T(B) = \frac{D_0}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

Mis à profit dans les TPC

Transverse diffusion  $\sigma$  ( $\mu\text{m}$ ) for a drift of 15 cm in different Ar/CH<sub>4</sub> mixtures





**DELPHI**

# Exemples de chambres à dérivation

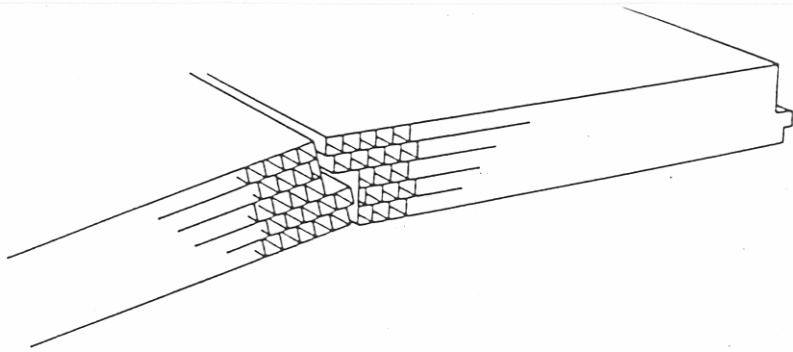


Fig. 3. Schematic view of drift tubes in adjacent modules.

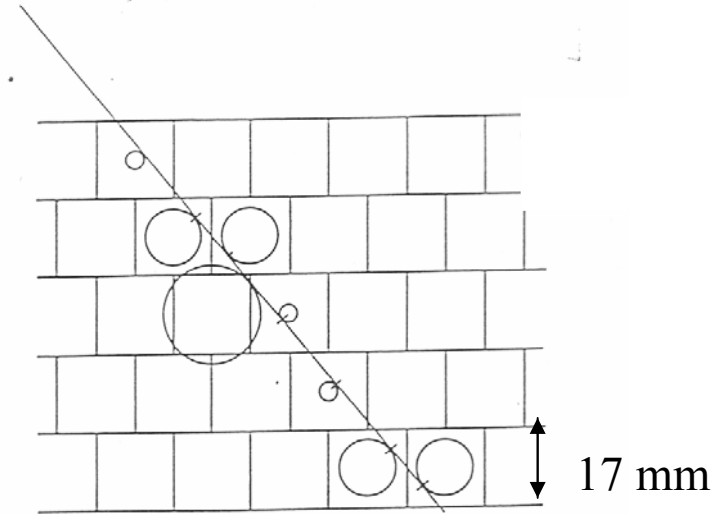


Fig. 12. Reconstructed cosmic-ray track.

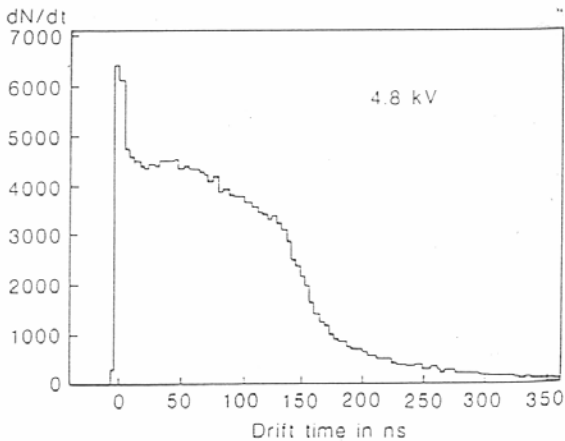
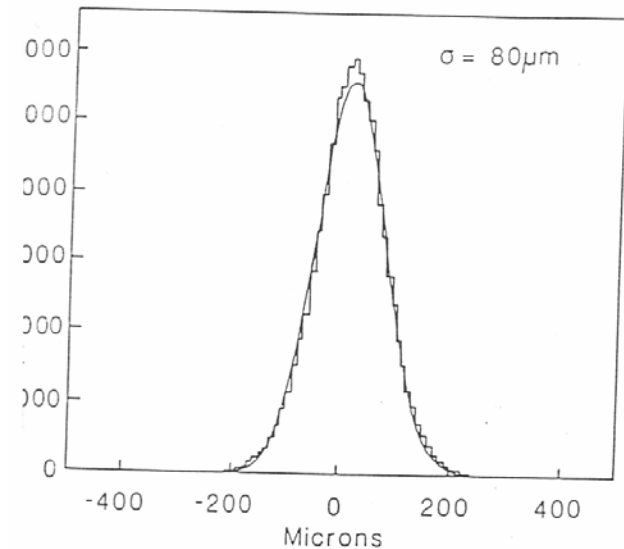
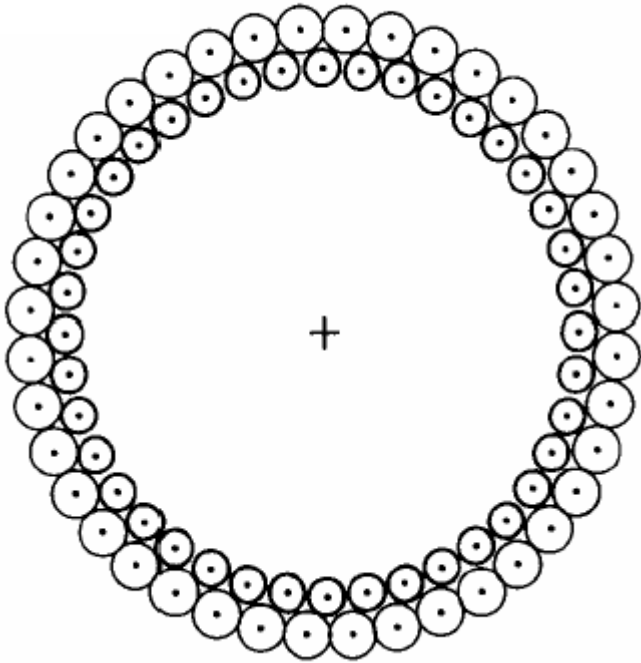


Fig. 11. Raw drift-time distribution.

DELPHI OD



# Exemples de chambres à dérivation



Pailles : utilisées pour l'ID de DELPHI

Example: DELPHI Inner detector

5 layers with 192 tubes each

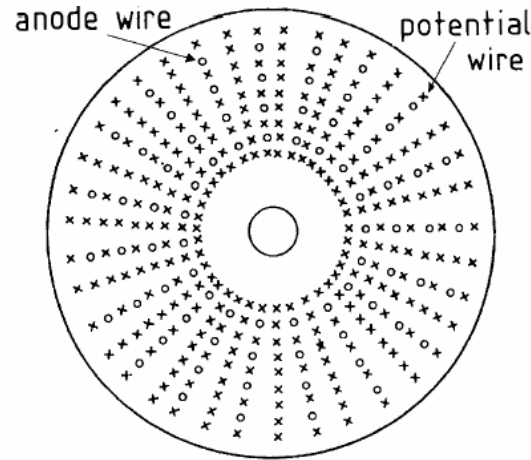
tube  $\varnothing$  0.9 cm, 2 m long,

wall thickness 30  $\mu\text{m}$  (Al coated polyester)

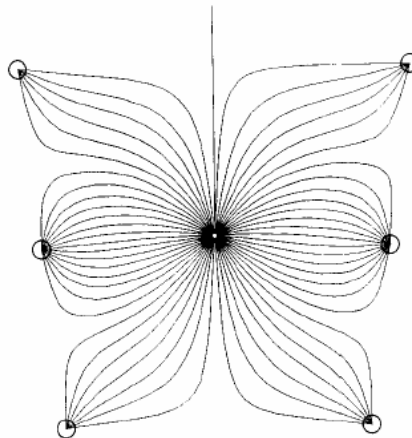
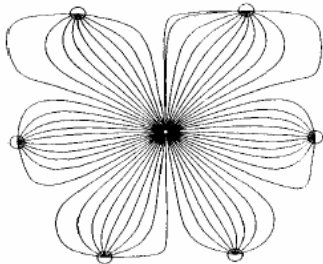
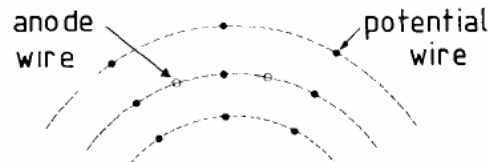
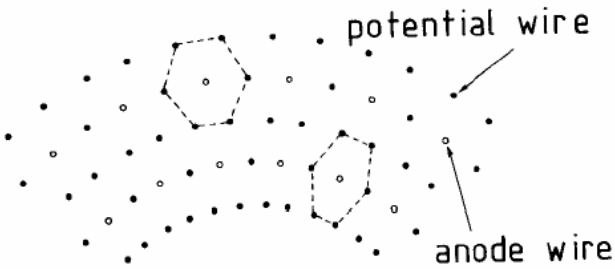
wire  $\varnothing$  40  $\mu\text{m}$

Intrinsic resolution ca. 50  $\mu\text{m}$

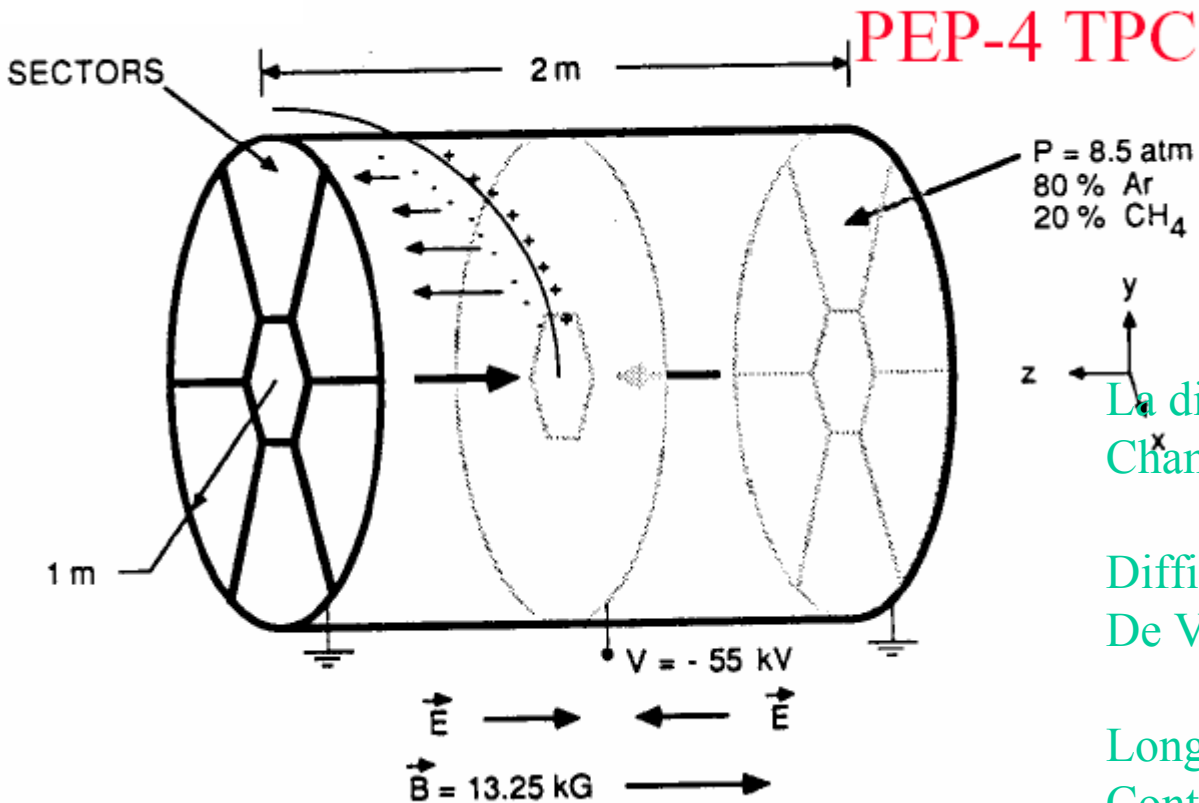
# Exemples de chambres à dérivation



Géométries typiques pour des chambres cylindriques



# Chambres à Projection Temporelle



PEP-4 TPC

X et Y mesurés par  
des MWPC aux extrémités  
Z obtenu par temps  
de dérive

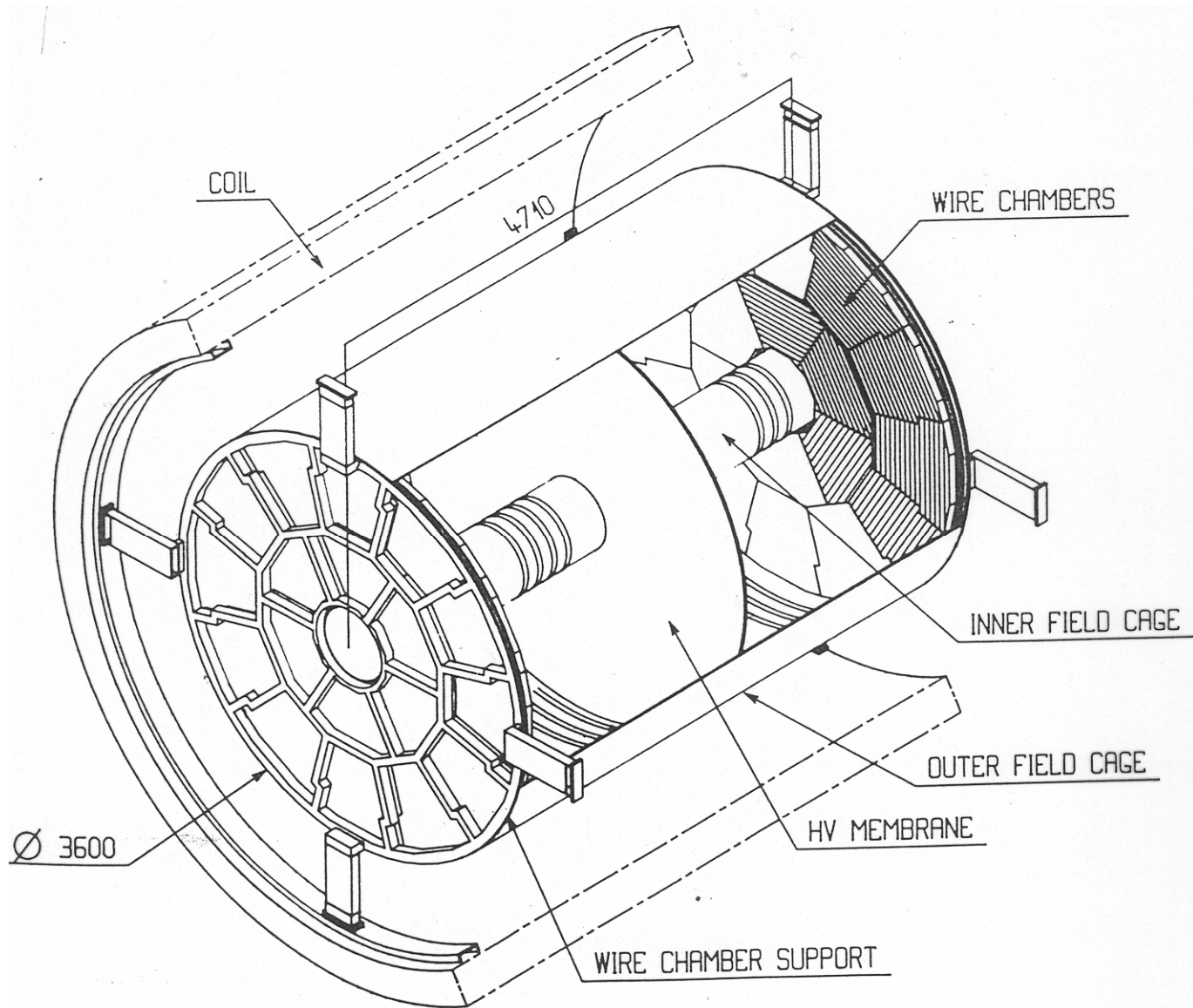
La diffusion est réduite par le  
Champ magnétique

Difficulté : connaissance précise  
De  $V_D$  : étalonnage par laser

Longue distance de dérive :  
Contrôle de la pureté du gaz

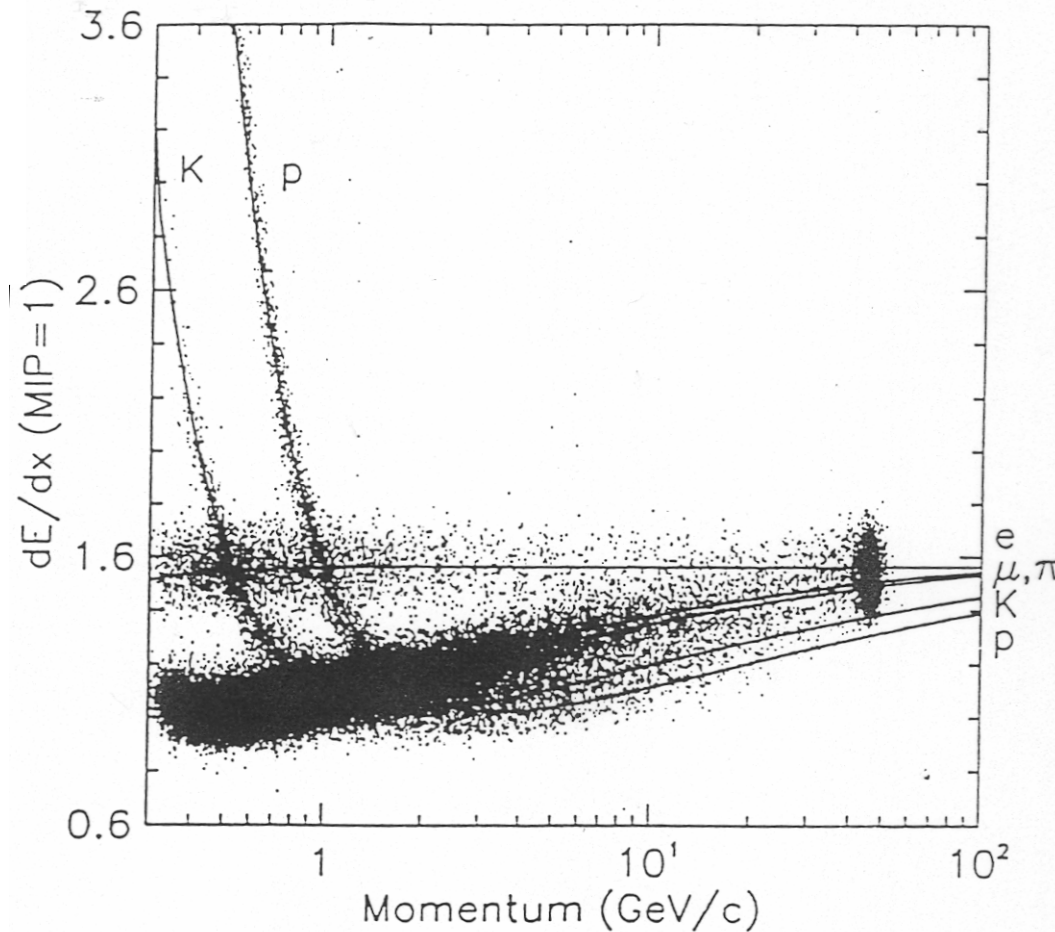
Il faut « nettoyer » la TPC des  
Ions positifs

# ALEPH TPC





# Mesure du $dE/dx$ avec la TPC ALEPH



Utilisation pour identifier  
la nature des particules

Mise à profit du nombre  
important de mesures  
individuelles sur chaque  
trace (asymétrie de la  
distribution de Landau)

# Détection de photons X/UV avec les détecteurs gazeux

- 13 -

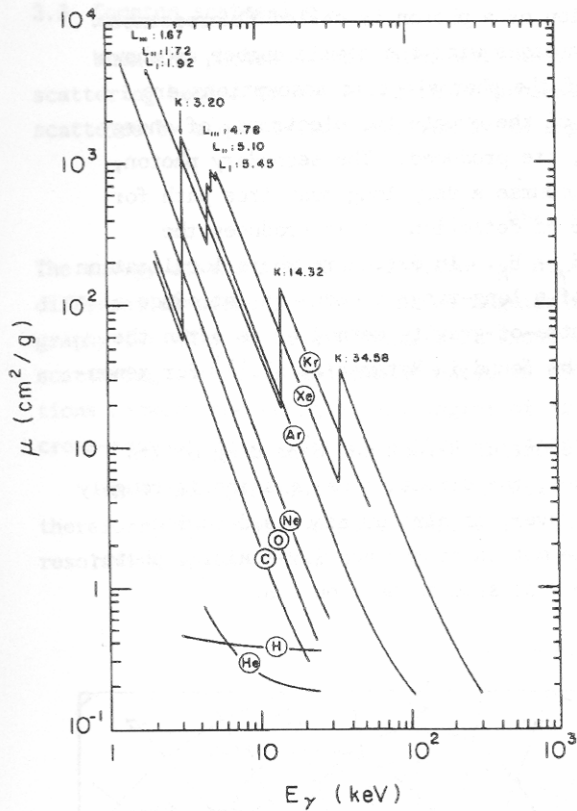


Fig. 11 Absorption coefficient versus energy of photons, in several gases used in proportional counters. Carbon is included, to allow the calculation of absorption in hydrocarbons. The figure has been drawn using the tabulations of Ref. 13.

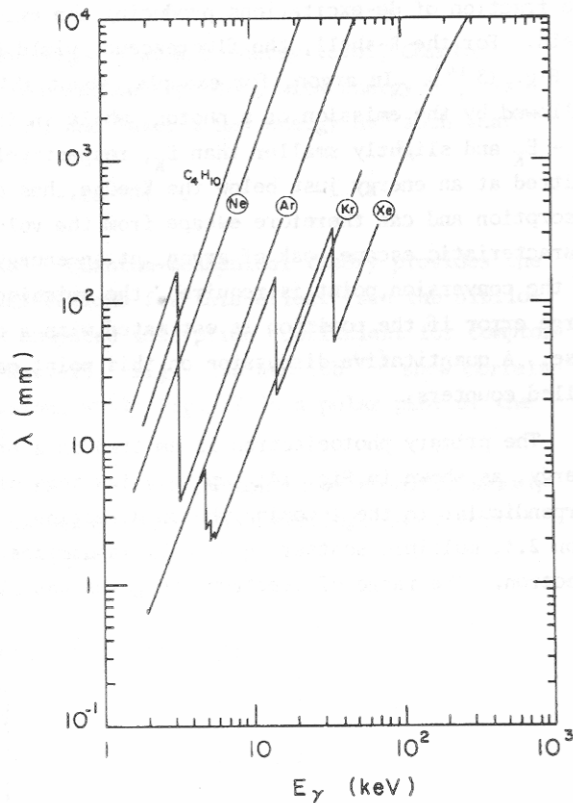
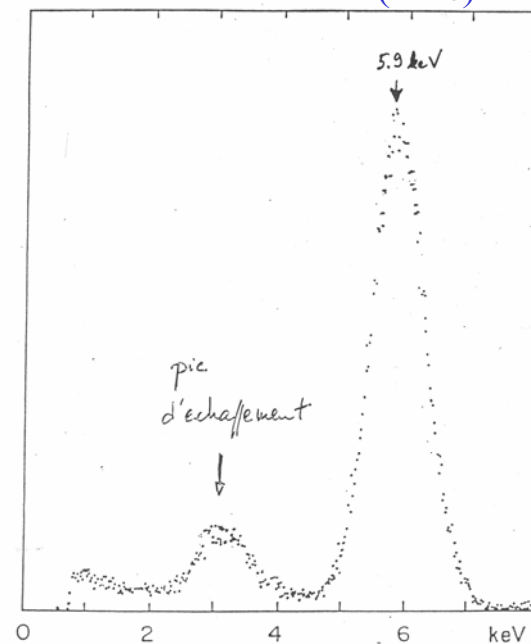


Fig. 12 Mean free path for absorption in several gases at normal conditions, for photons of energy  $E_\gamma$  (from the tabulation in Ref. 13)

Quelques mm ou cm de gaz suffisent à arrêter des photons de basse énergie (quelques keV)

Détection de  $\gamma$  De 5.9 keV ( $^{55}\text{Fe}$ )



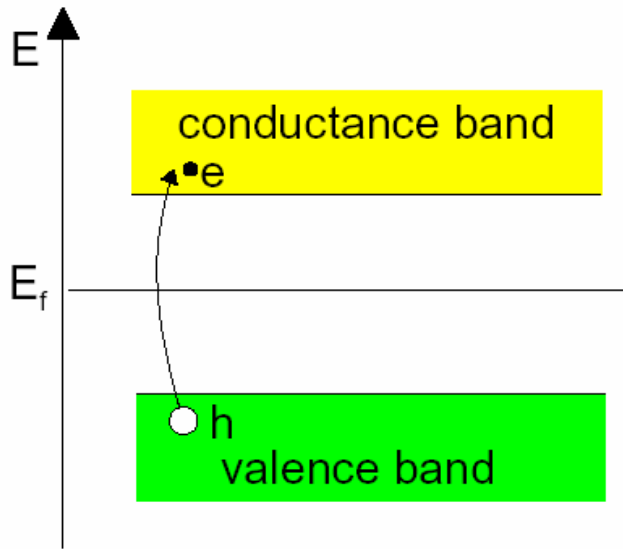
# Détecteurs à semi-conducteurs

- Ils ne seront vus que sous leur aspect « suivi des traces chargées », le plus important en physique des particules
- Sont en général placés près du point d'interaction, afin d'observer les désintégrations de particules lourdes (vertex déplacés)
- Très bonne résolution (quelques  $\mu\text{m}$ )
- Naturellement rigides (simplifie la mécanique)
- Mais :
  - Chers !
  - Pas d'amplification du signal

# Caractéristiques

- En moyenne, il faut 3.6 eV pour produire une paire électron-trou / cf environ 30 eV pour les détecteurs gazeux...
- Densité 2.33 g/cm<sup>3</sup> . Permet un dépôt d'énergie important : 390 eV/μm, soit environ 108 paires électron-trou (pour une MIP)
- Réponse rapide : la faible taille des structures détectrices (de l'ordre de la dizaine de μm) combinée à une grande mobilité conduit à des signaux de temps de montée de l'ordre de 10 ns.

# Principe de fonctionnement



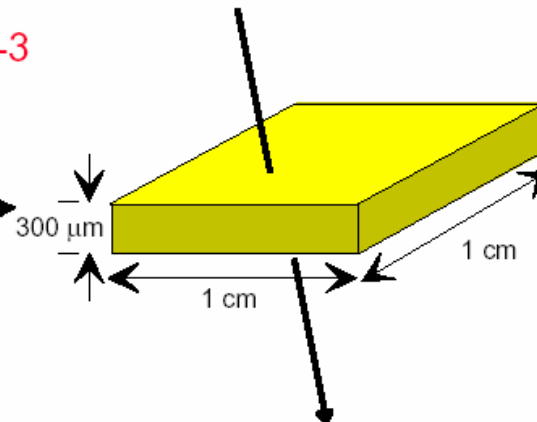
In a pure intrinsic (undoped) material the electron density  $n$  and hole density  $p$  are equal.  $n = p = n_i$

$S/\sqrt{B} \approx 1$ ,  
ca ne peut pas fonctionner.

Il faut arriver à réduire la densité de porteurs libres

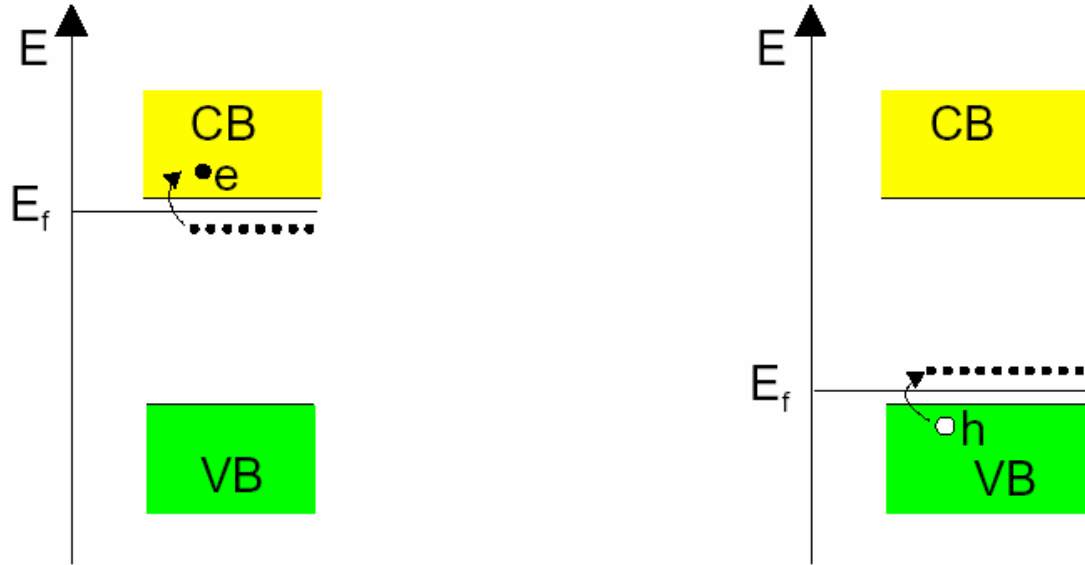
For Silicon:  $n_i \approx 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

In this volume we have  $4.5 \cdot 10^8$  free charge carriers, but only  $3.2 \cdot 10^4$  e-h pairs produced by a M.I.P.



Utilisation de jonctions pn polarisées en inverse

# Dopage



**n-type:** Add elements from V<sup>th</sup> group, **donors**, e.g. As. Electrons are the majority carriers.

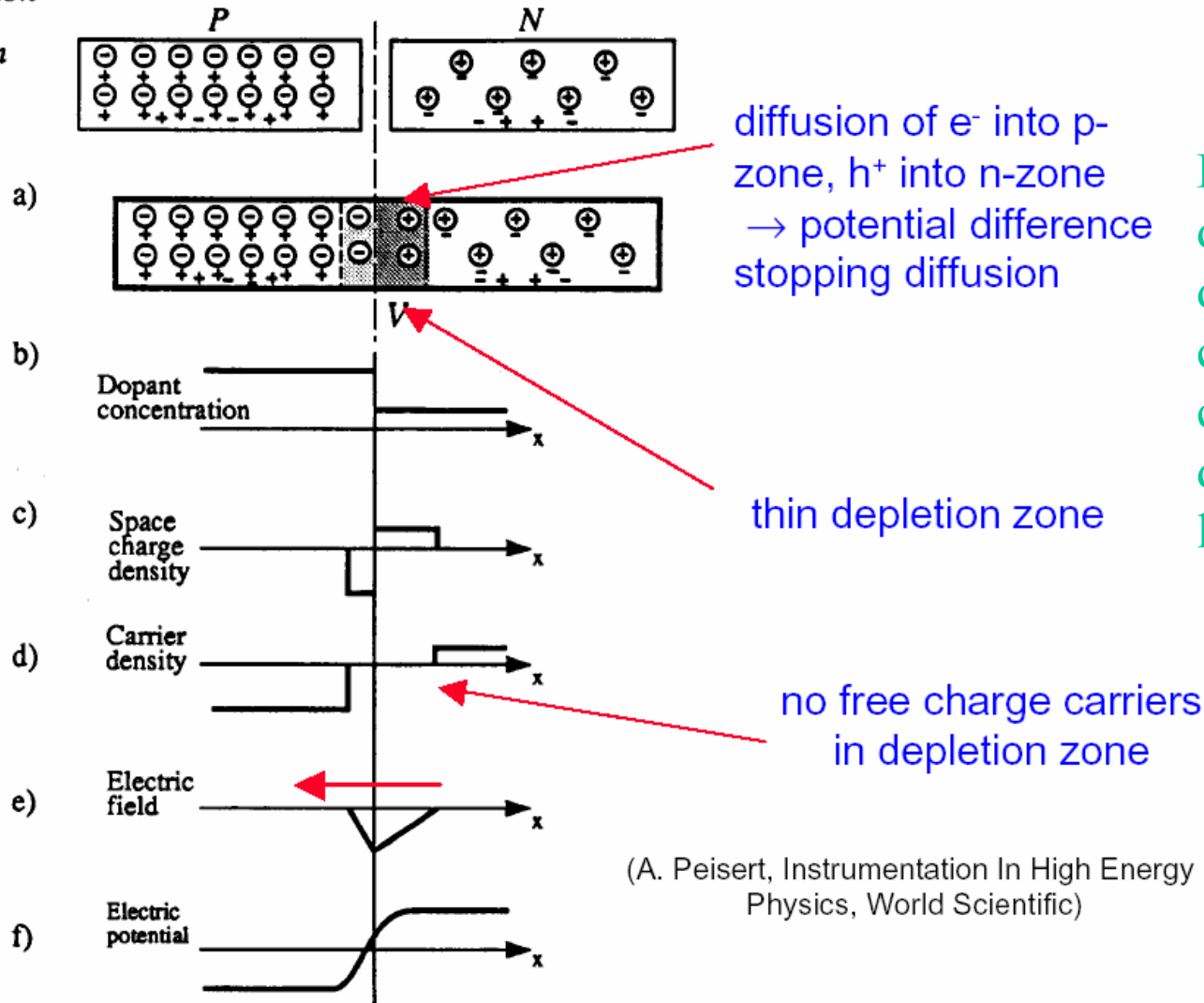
**p-type:** Add elements from III<sup>rd</sup> group, **acceptors**, e.g. B. Holes are the majority carriers.

	detector grade	electronics grade
doping concentration	$10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ (n) - } 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ (p}^+)$	$10^{17(18)} \text{ cm}^{-3}$
resistivity	$\approx 5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	$\approx 1 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

# Jonction PN

⊖ Acceptor ion  
 ⊕ Donor ion  
 + Hole  
 - Electron

## THE PN JUNCTION



diffusion of  $e^-$  into p-zone,  $h^+$  into n-zone  
 → potential difference stopping diffusion

thin depletion zone

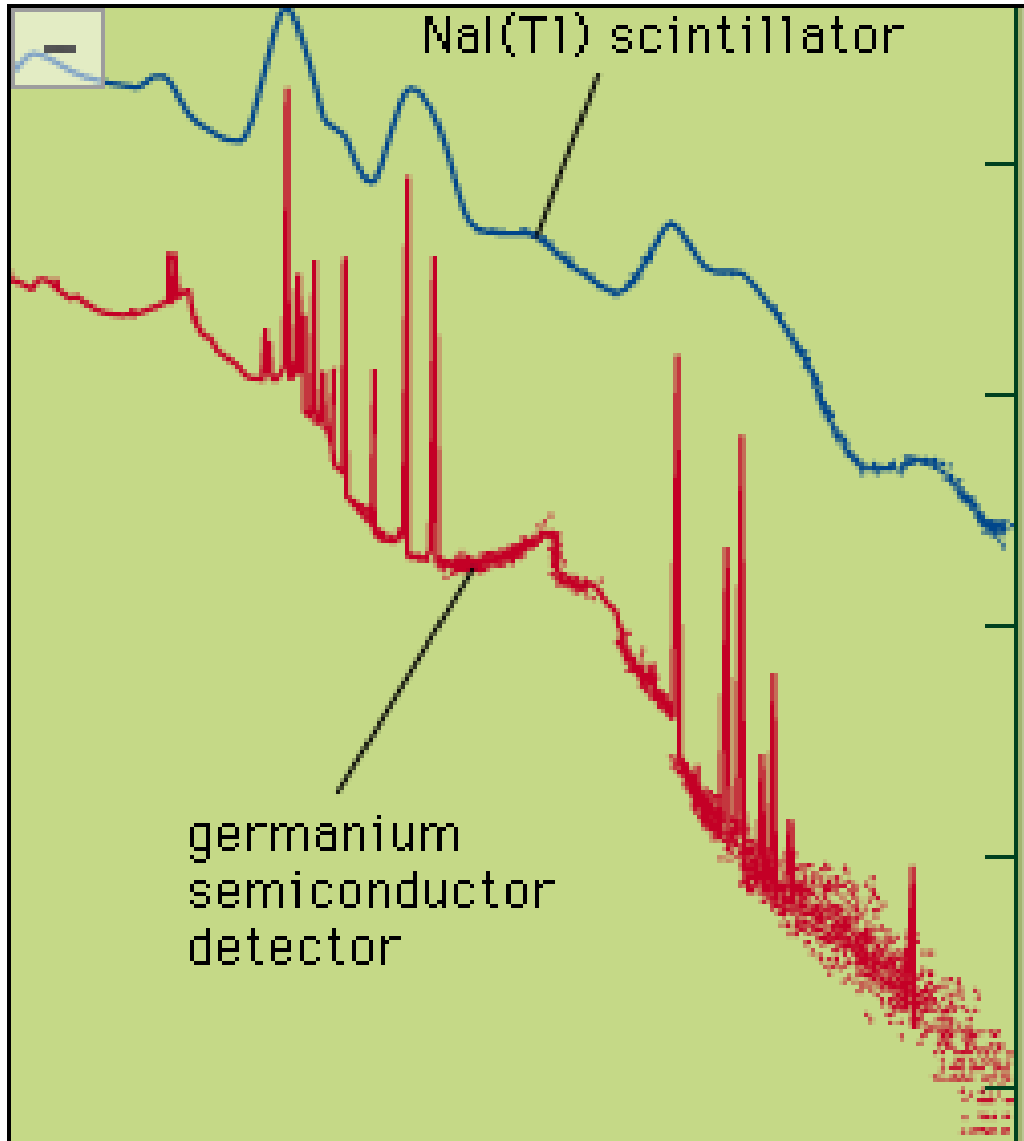
no free charge carriers in depletion zone

(A. Peisert, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific)

L'application d'une tension de l'ordre de la centaine de volts chasse les porteurs de l'ensemble de la jonction

L'ionisation déposée dans la zone dépeuplée, sous forme de paires électron-trou, dérive vers les bornes, et donne un signal mesurable

# Mesure d'énergie totale avec un détecteur semi-conducteur



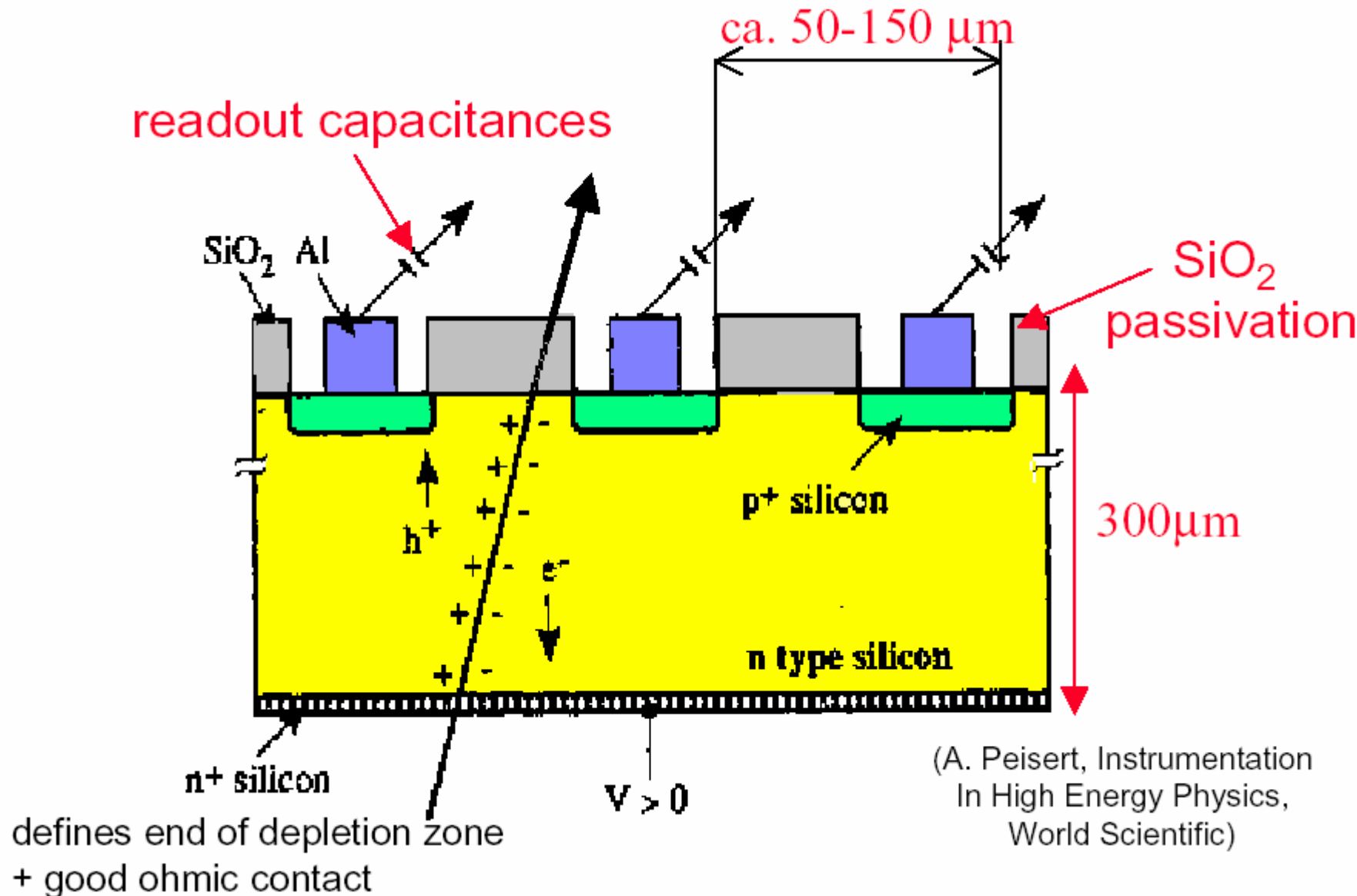
Particule arrêtée par la  
jonction → mesure  
d'énergie totale

Excellente résolution  
(0.1%)

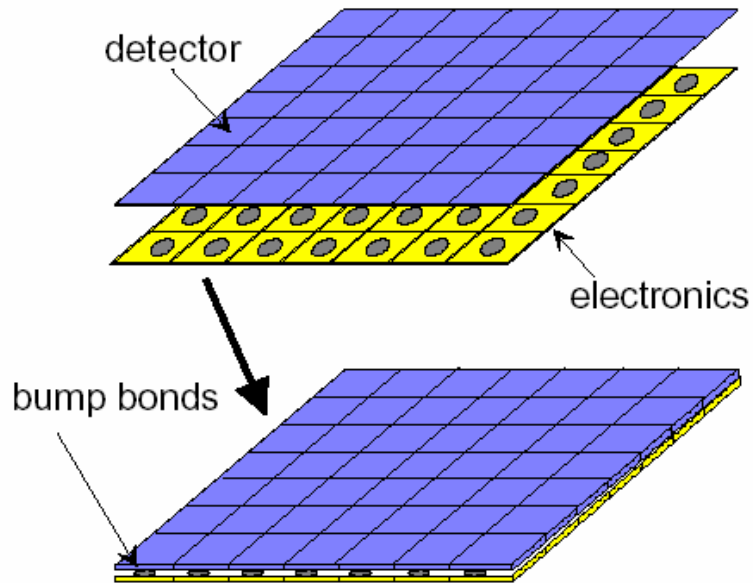
Cher !



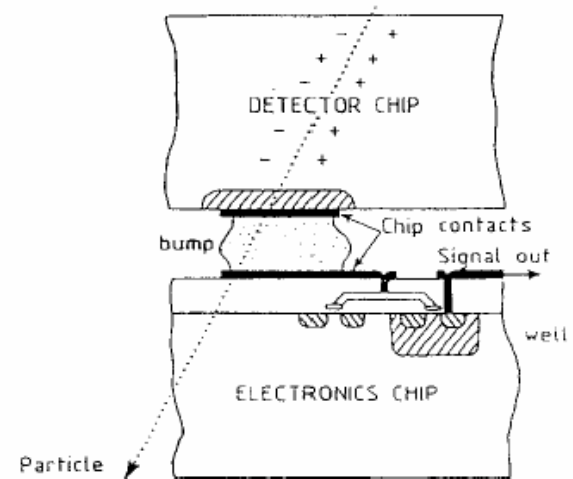
# Structure d'un détecteur de traces



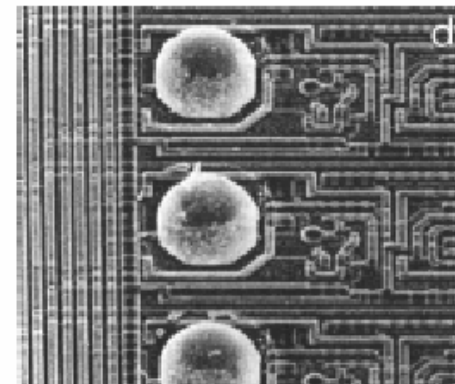
# Matrices de pixels



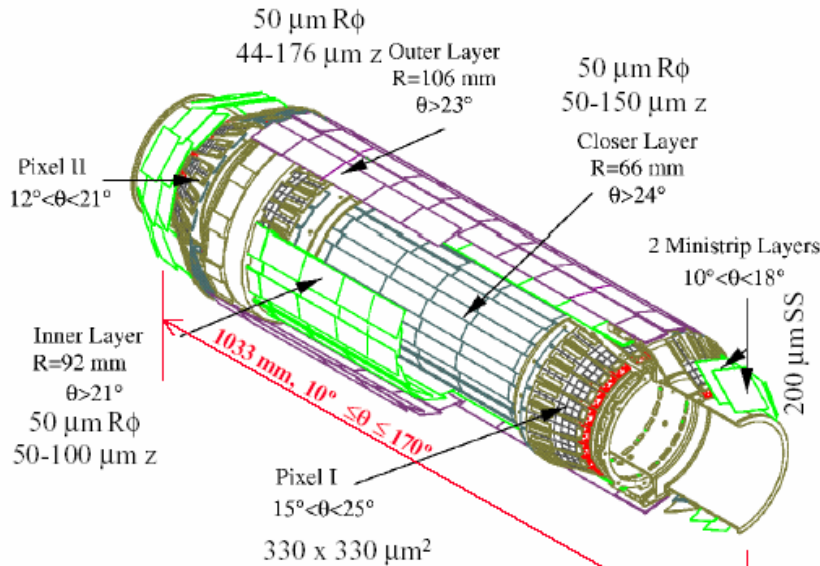
## Flip-chip technique



RD 19, E. Heijne et al., NIM A 384 (1994) 399



# Exemple de détecteur



## Détecteur microvertex de DELPHI

Alignement extrêmement important : il faut connaître la position des plaquettes à quelques  $\mu\text{m}$  près

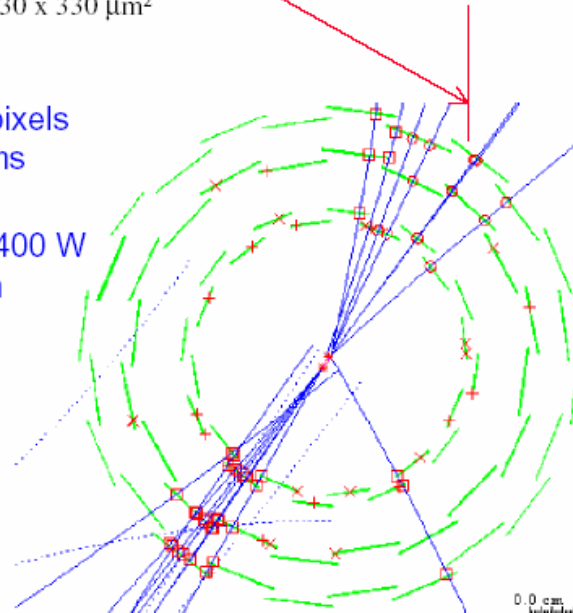
- Déformation de la structure ?
- Redondance
- Effets thermiques ?

readout channels  
ca. 174 k strips, 1.2 M pixels  
total readout time: 1.6 ms

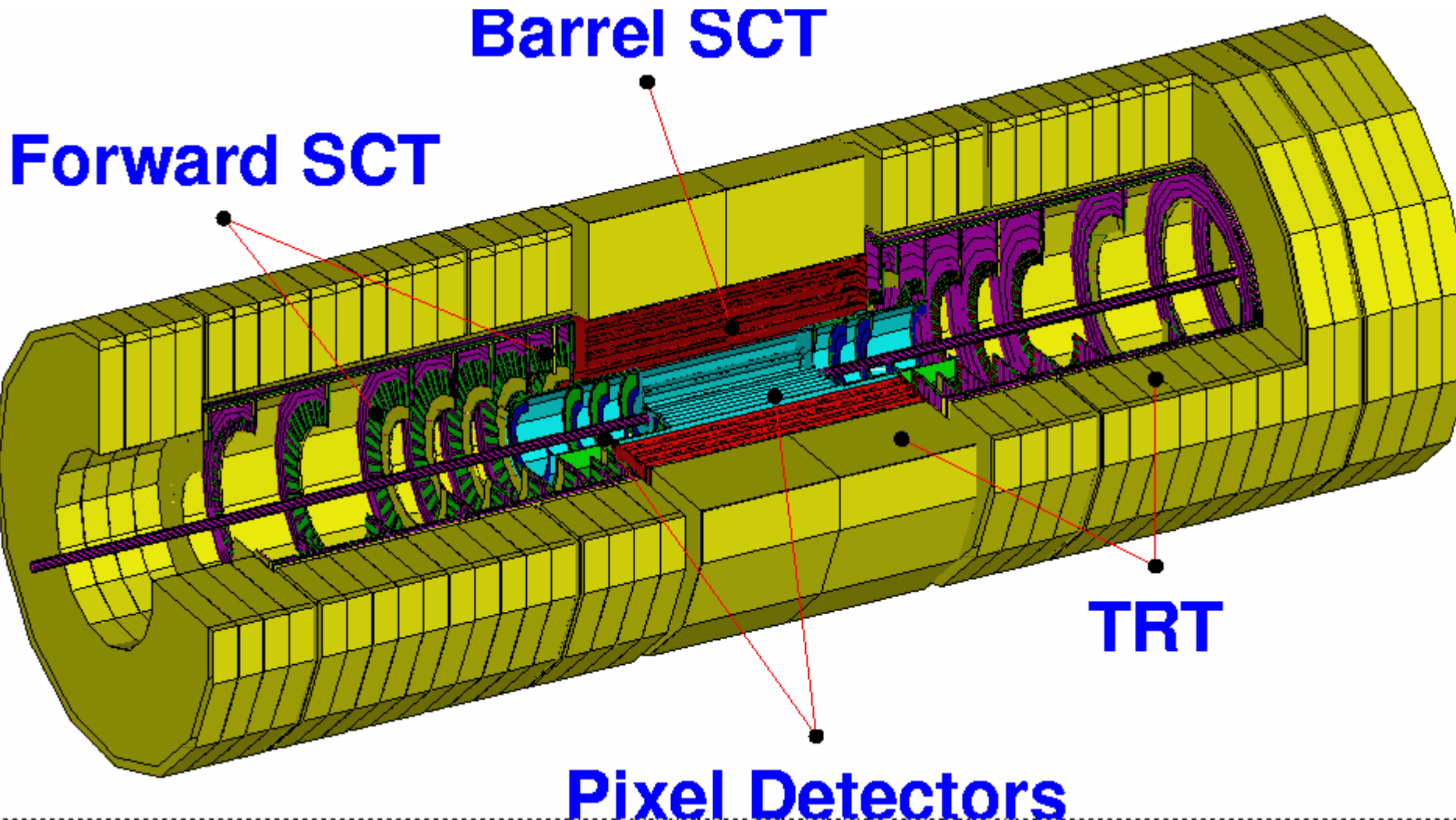
Total dissipated power 400 W  
→ water cooling system

Hit resolution in barrel part  $\approx 10 \mu\text{m}$   
Impact parameter resolution ( $r\phi$ )

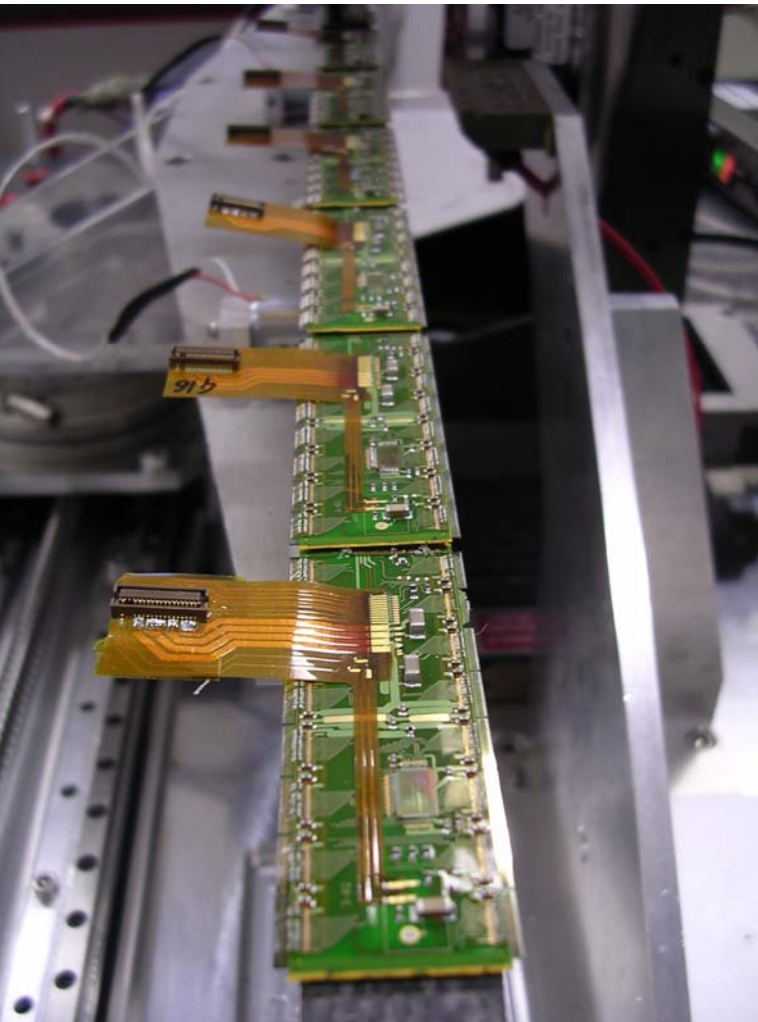
$$28\mu\text{m} \oplus 71 / \left( p \sin^2 \theta \right)$$



# Détecteur interne ATLAS

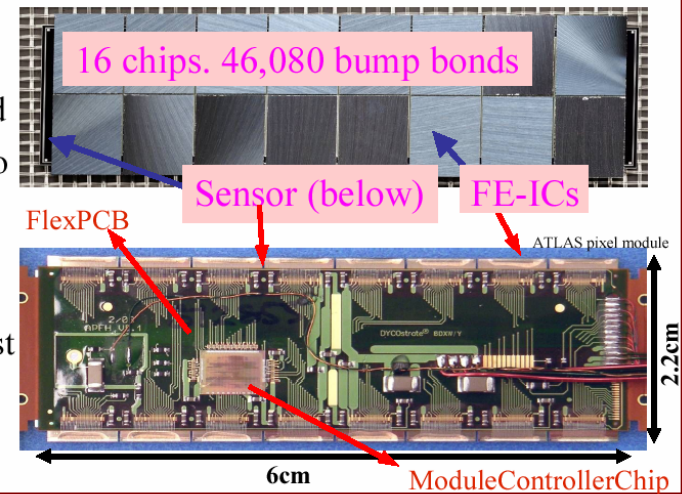
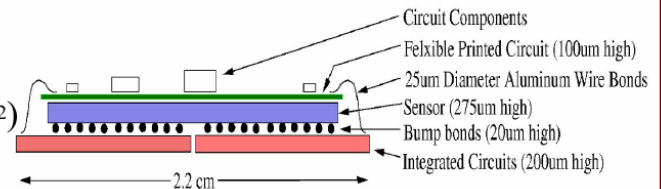


# Pixels ATLAS



## Pixel Module

- radiation hard to 50MRad (NIEL >  $10^{15}$  1 MeV  $n_{eq}/cm^2$ )
- fast readout (25ns beam crossing, 3.2 $\mu$ s latency)
- Hybrid chip technology
- 0.25 $\mu$ m CMOS FrontEnd
- 1 Sensor bump bonded to 16 FrontEnd chips
- FrontEnd chips connect to ModuleControllerChip
- Zero suppression and first event building



Andreas Korn, LBNL

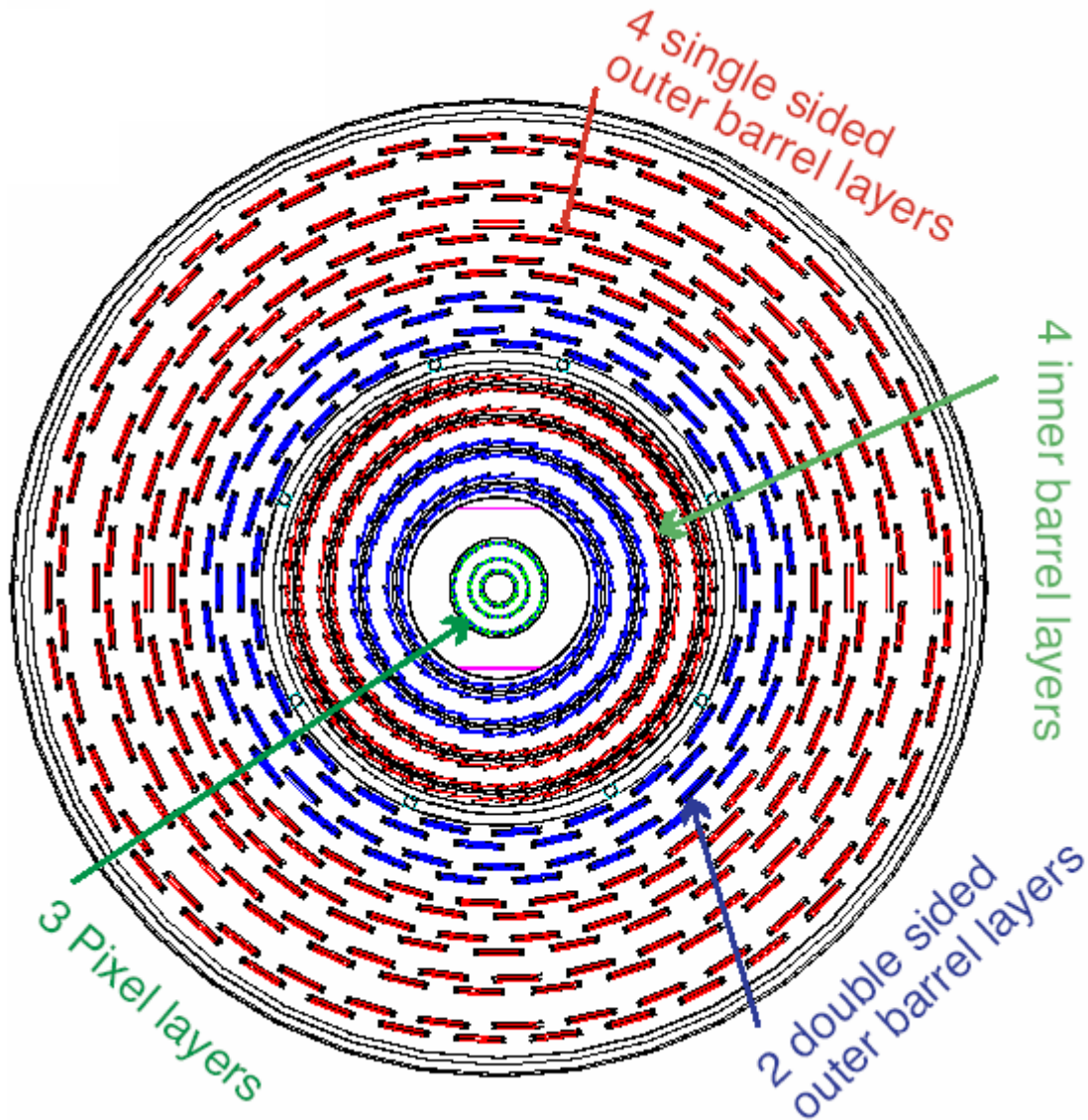
IPRD06, Siena 02.10.06

6

# Caractéristiques et performances

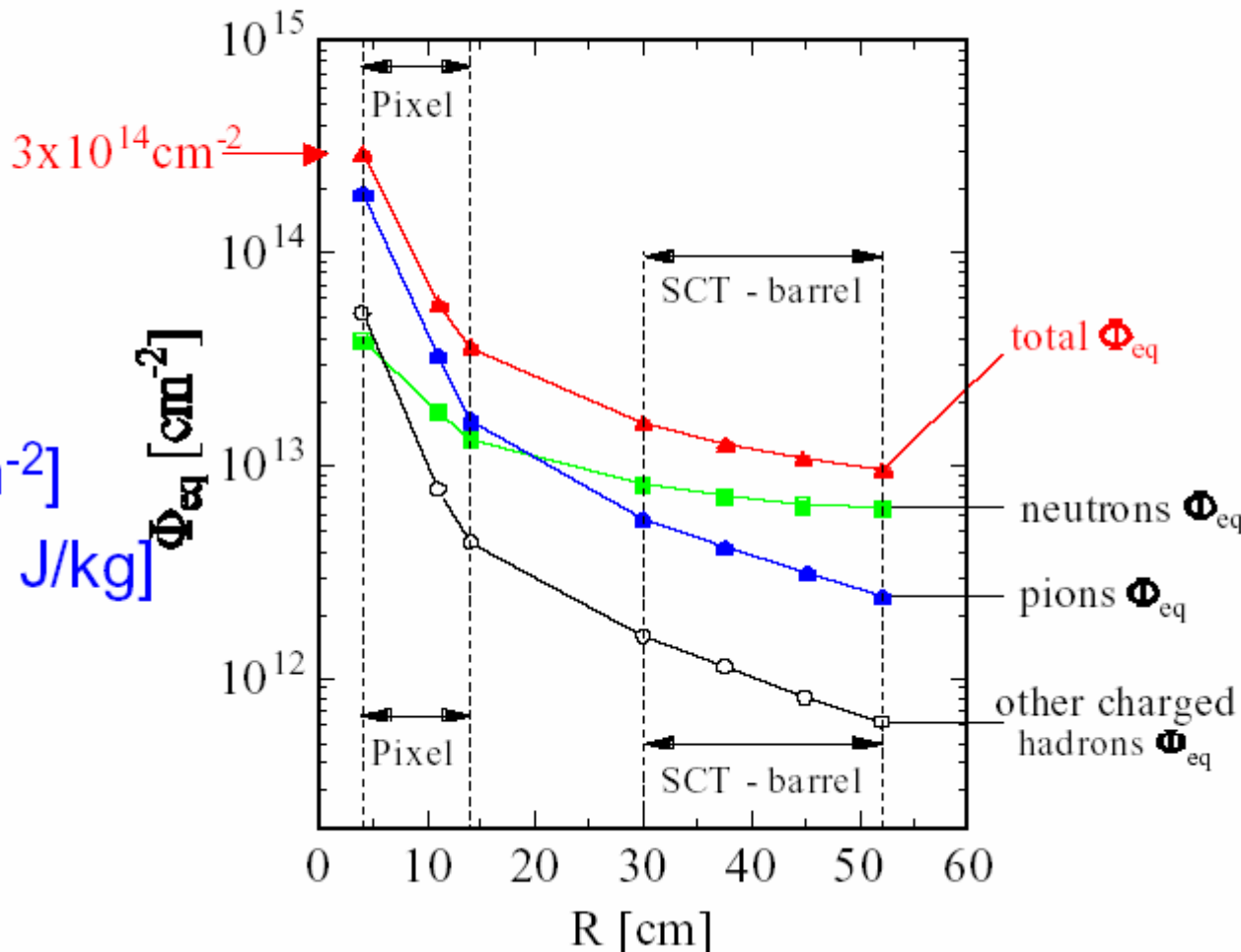
- Trois couches de pixels à 5.05, 10.1 et 13.2 cm
- Taille des pixels :  $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$
- Quatre couches de microstrips de rayon compris entre 30 et 52 cm.
- Résolution de  $22 \mu\text{m}/\text{point}$
- 8 points de mesure/trace (strips) +3 (pixels)
- Environ  $35 \text{ m}^2$  de Silicium, environ 100 M voies de lecture.

# Tracker CMS



# Gros problème au LHC: l'irradiation

## ATLAS - Inner Detector



Dose = E/m (Gy)

Fluence = N/surface ( $N/cm^2$ )

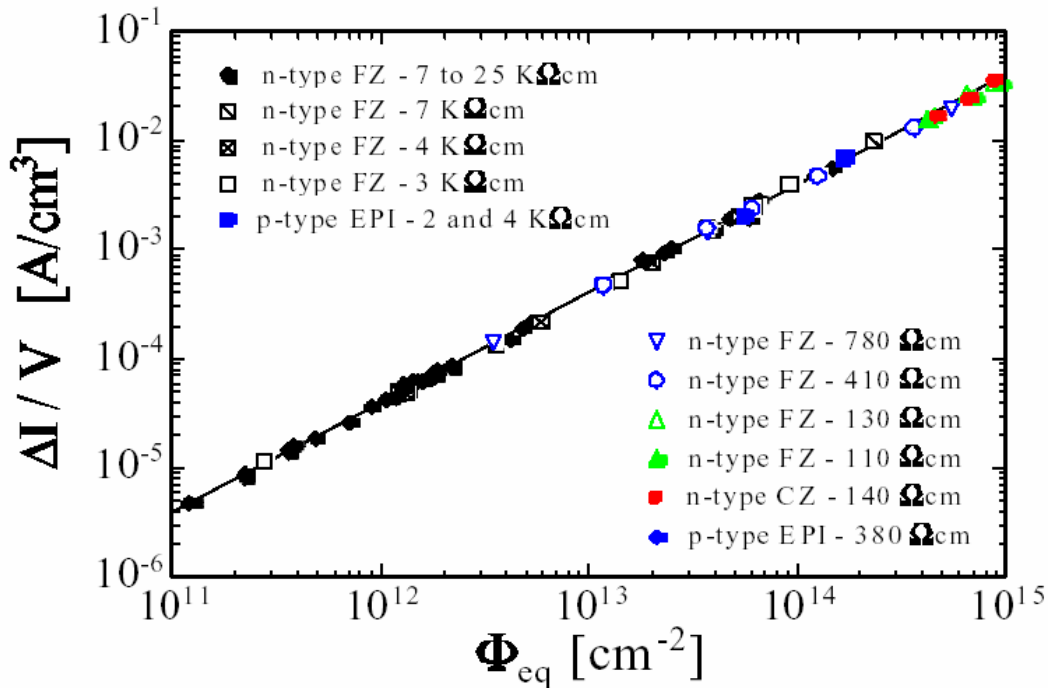
Dose/fluence ne suffisent pas à caractériser les effets, le type de particule, son énergie interviennent aussi

Problème complexe !

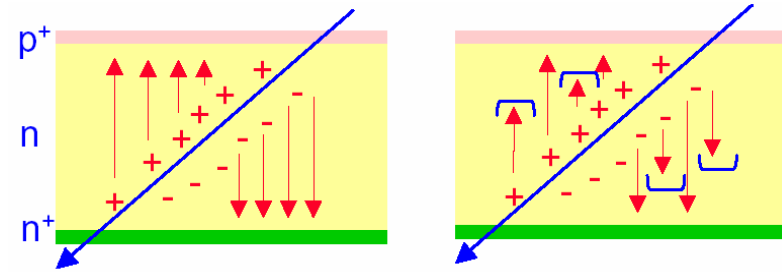
Dommages par déplacement d'atomes, création et déplacement de défauts dans la matrice cristalline



# Effets de l'irradiation



Augmentation du courant de fuite

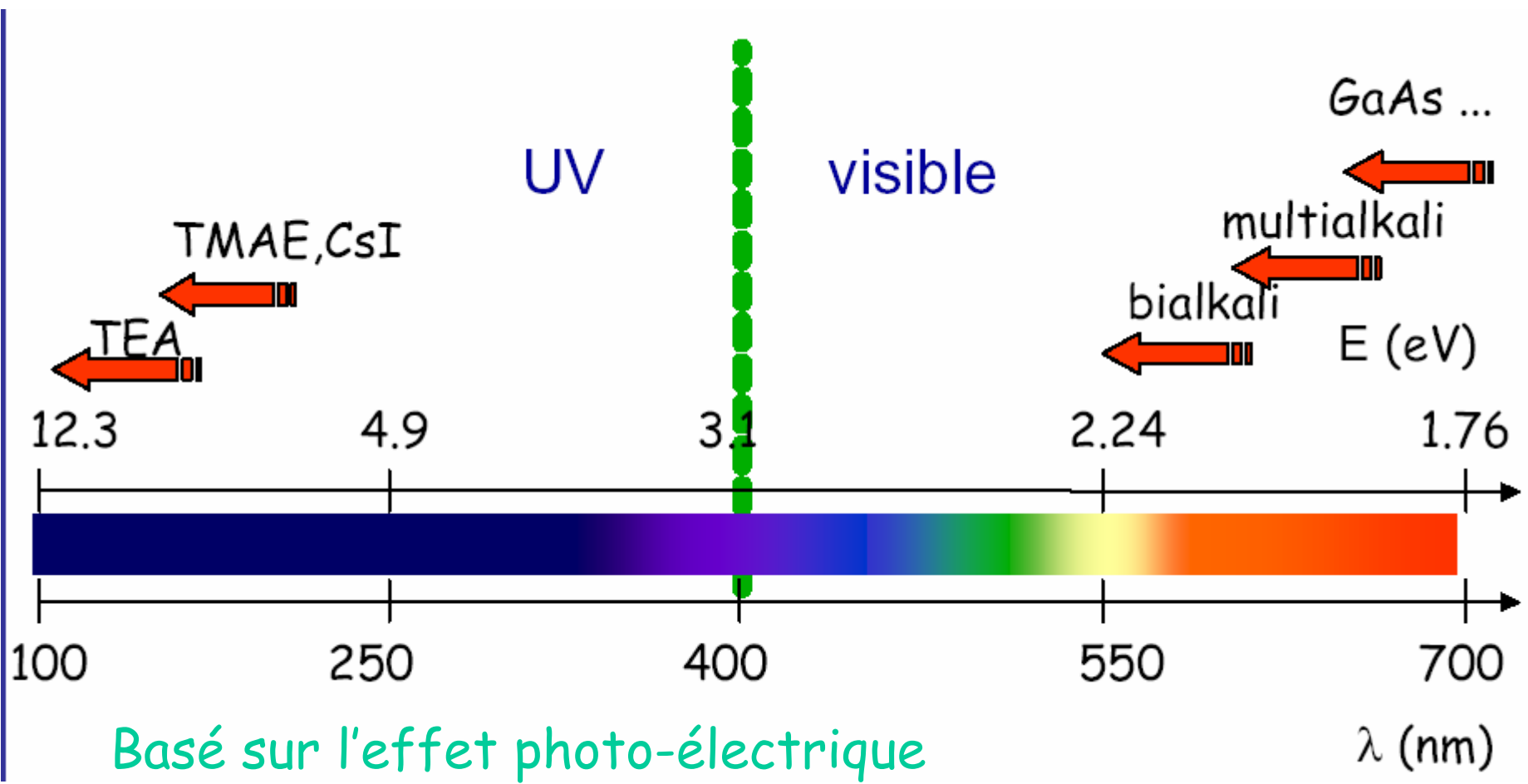


Diminution de l'efficacité de collection des charges

# Comment combattre ces effets ?

- Fonctionnement à basse température ( $-10^{\circ} C$ )
- Introduction d'impuretés dans le Si, qui influencent favorablement la formation de défauts (Oxygène)
- Règles de conception, usage de technologies intrinsèquement rad-hard

# Détection de lumière visible



Basé sur l'effet photo-électrique

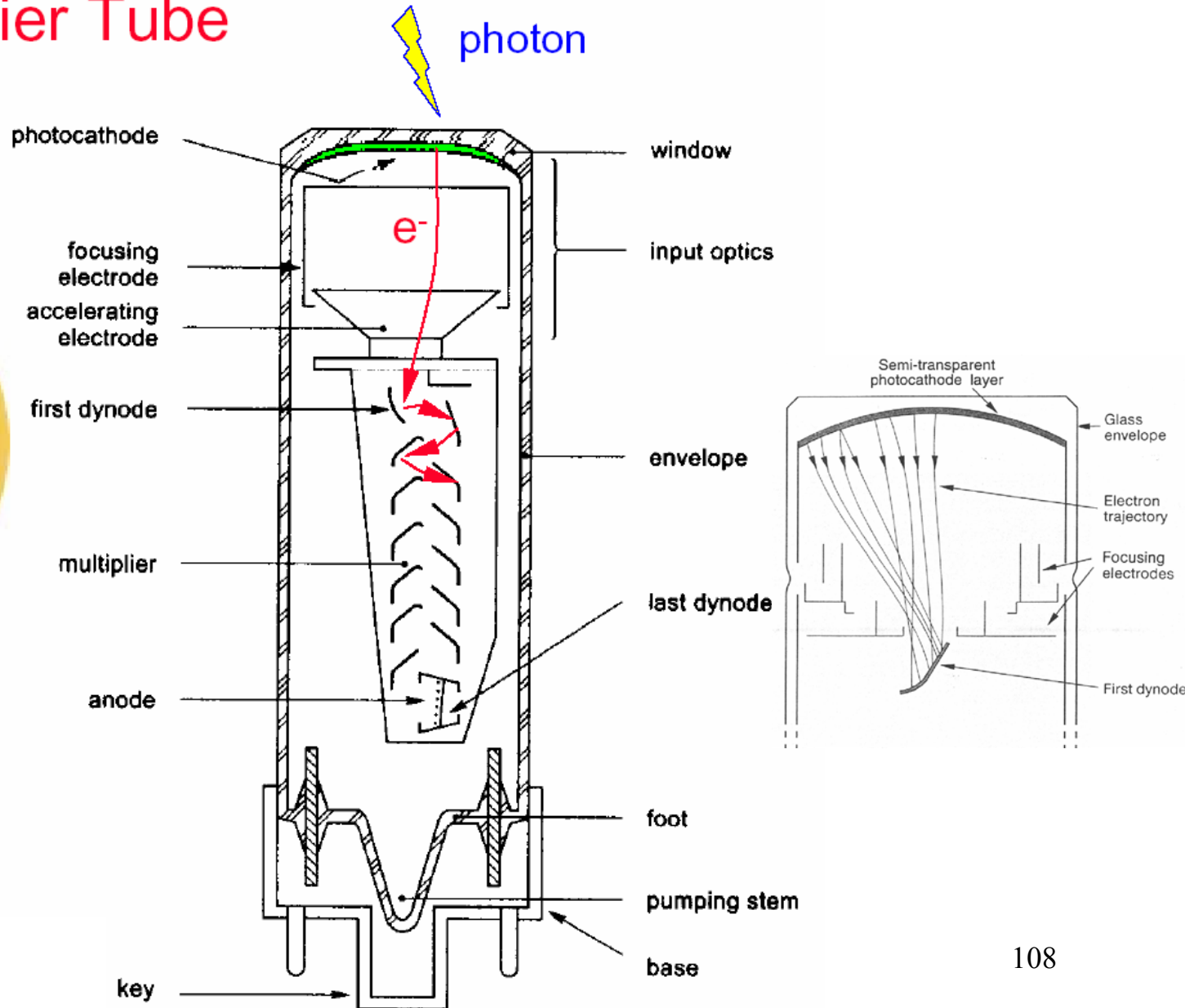
On privilégie les matériaux à forte efficacité quantique ( $N_{pe}/N_{\gamma}$ )

# Photo-multipliateurs

## Photo Multiplier Tube (PMT)

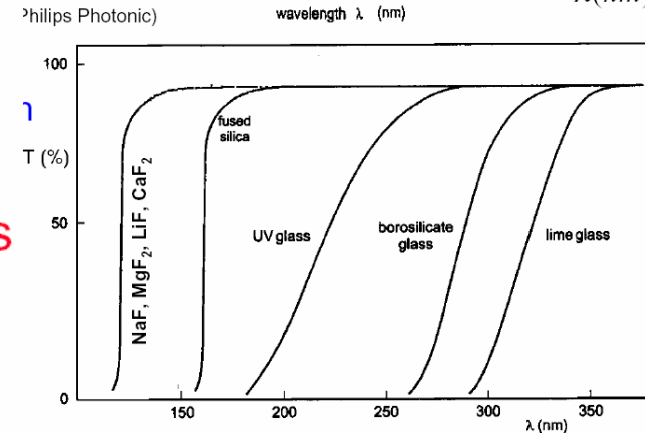
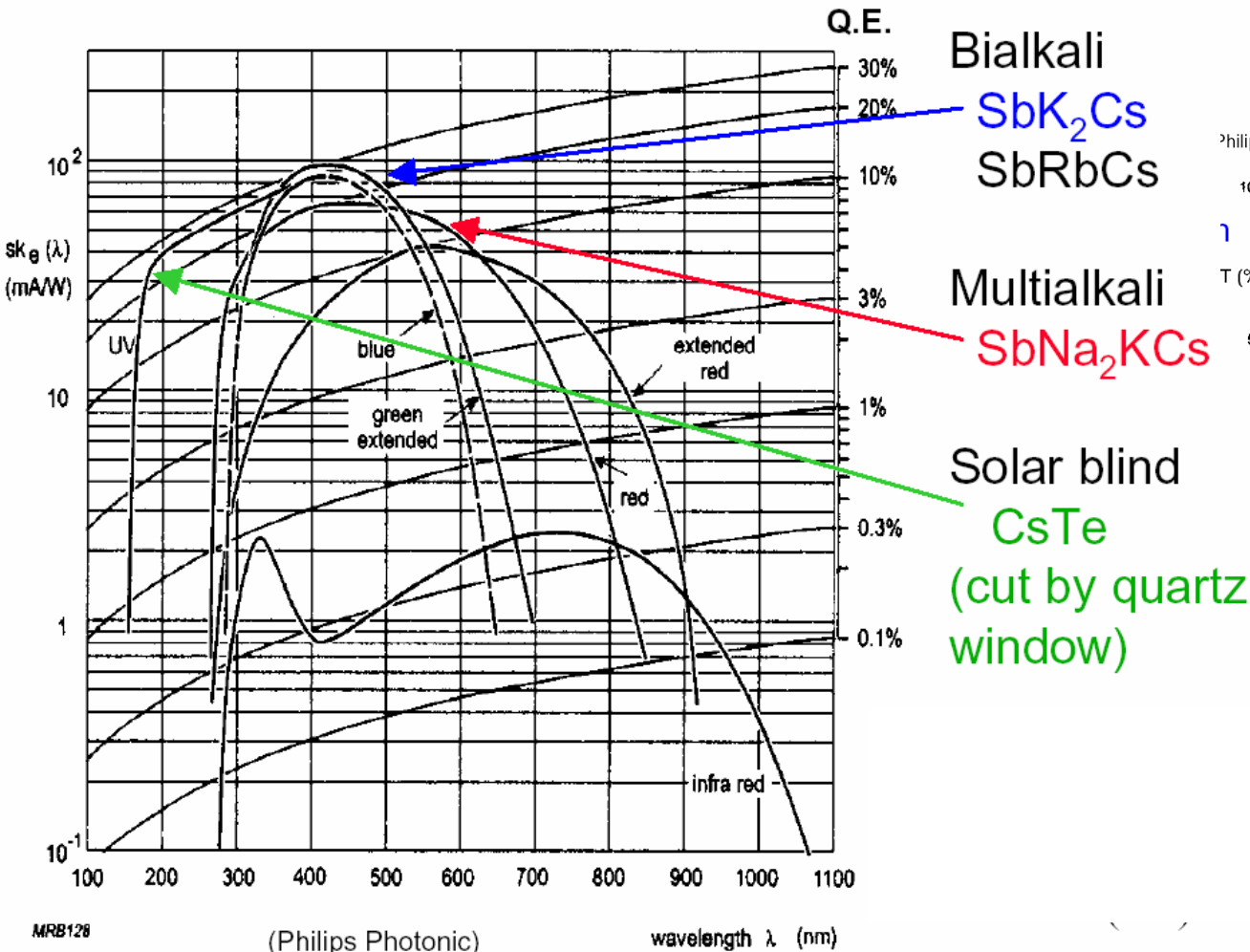


(Philips  
Photonic)



# Efficacités quantiques typiques

Transmission de verres utilisés pour fabriquer les PMs



# Fonctionnement du PM

- Emission photo-électrique à partir de la photocathode
- Multiplication par émission secondaire sur chaque dynode (gain de 3 à 50/dynode)

$$M = \prod_{i=1}^N g_i$$

- Gain total :
- Typiquement une dizaine de dynodes, gains totaux de  $10^4$  à  $10^6$
- Grande sensibilité aux champs magnétiques : blindages en mu-métal souvent indispensables.

# Résolution en énergie

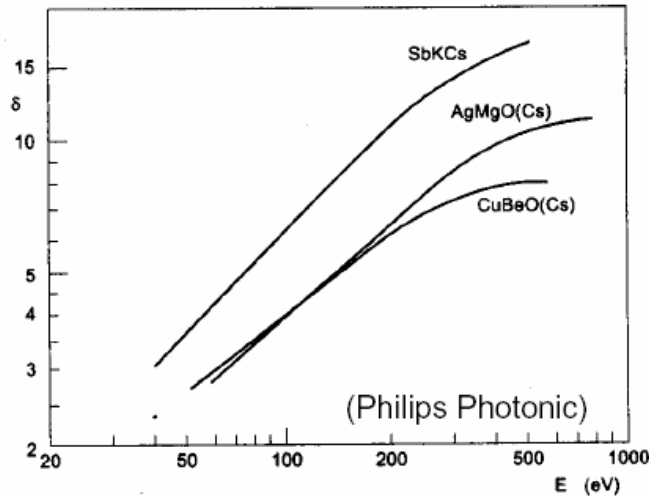
- La résolution en énergie est liée aux fluctuations du nombre d'électrons :

Poisson distribution: 
$$P(\bar{n}, m) = \frac{\bar{n}^m e^{-m}}{m!}$$

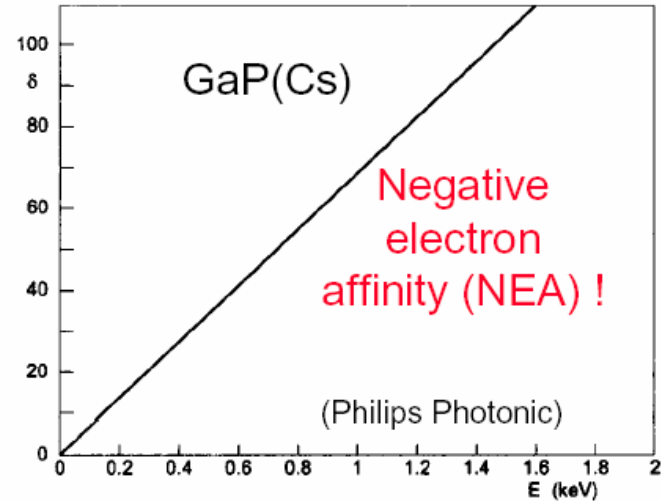
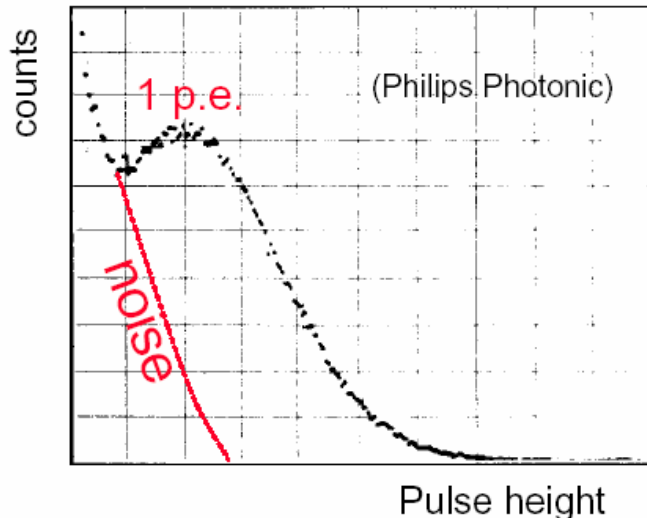
Relative fluctuation: 
$$\frac{\sigma_n}{\bar{n}} = \frac{\sqrt{\bar{n}}}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}$$

Les fluctuations sont plus grandes quand  $n$  est petit : la résolution est dominée par la première dynode.

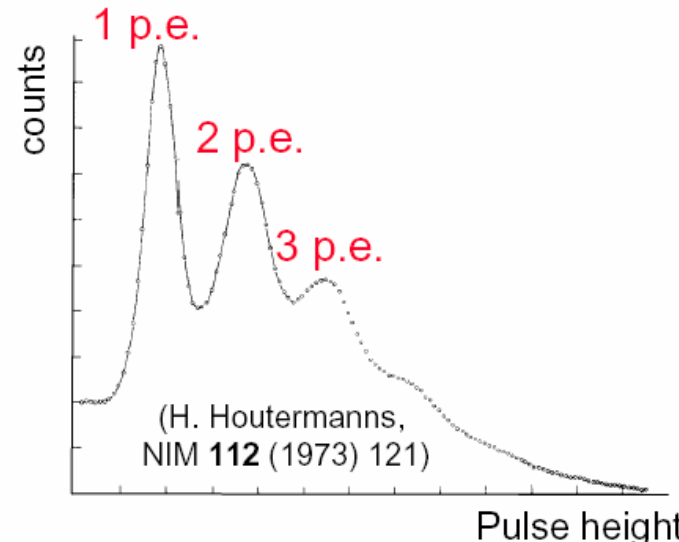
# Traduction pratique



Single photons.  
Pulse height spectrum of a  
PMT with Cu-Be dynodes.

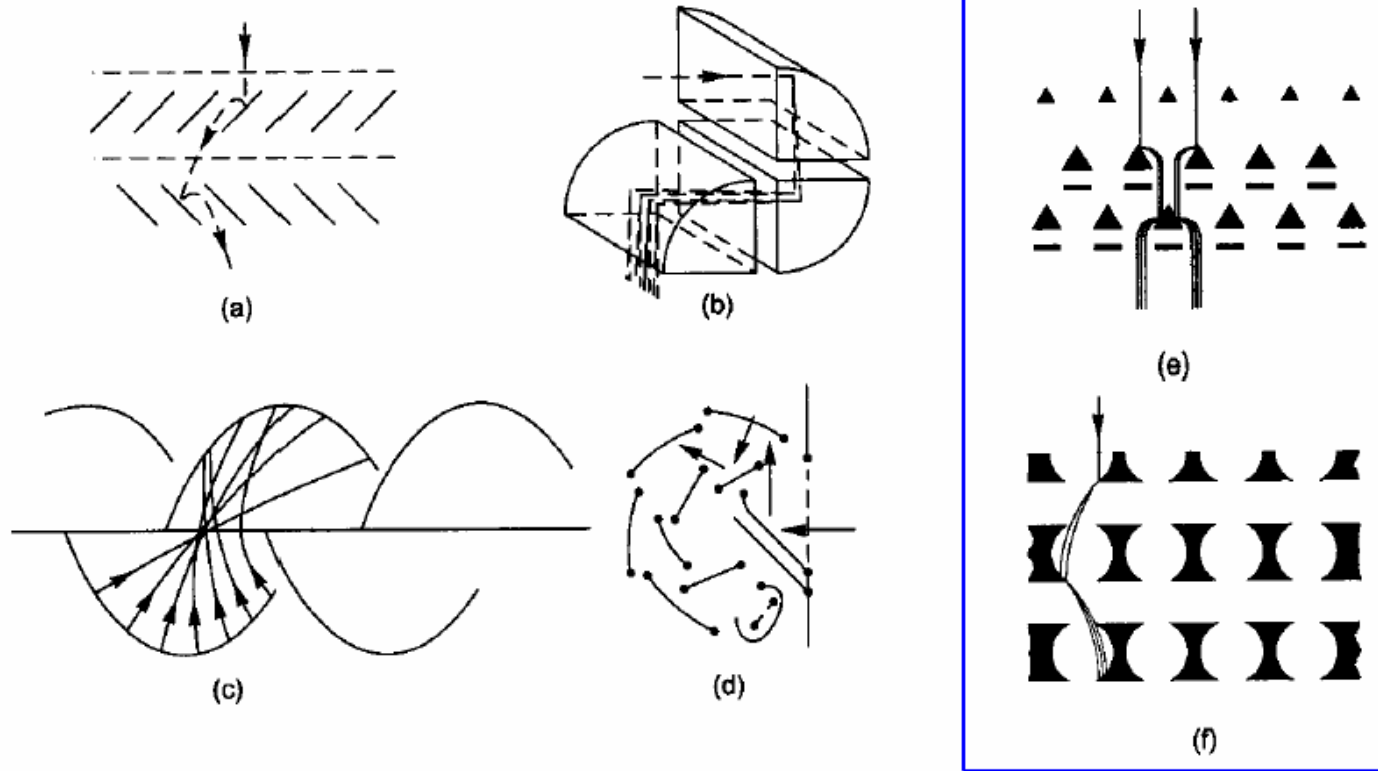


Pulse height spectrum of a  
PMT with NEA dynodes.





# Configuration des dynodes



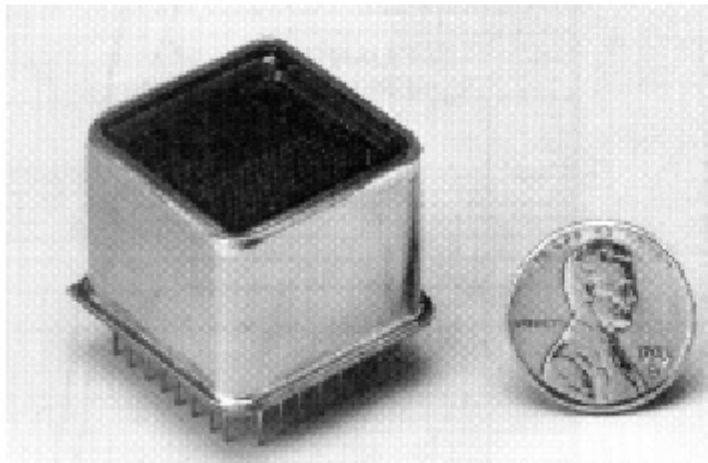
(Philips Photonics)

Dynode configurations: (a) venetian blind, (b) box, (c) linear focusing, (d) circular cage, (e) mesh and (f) foil

position  
sensitive  
PMT's

# Photomultiplicateur multi-anodes

**example: Hamamatsu R5900 series.**



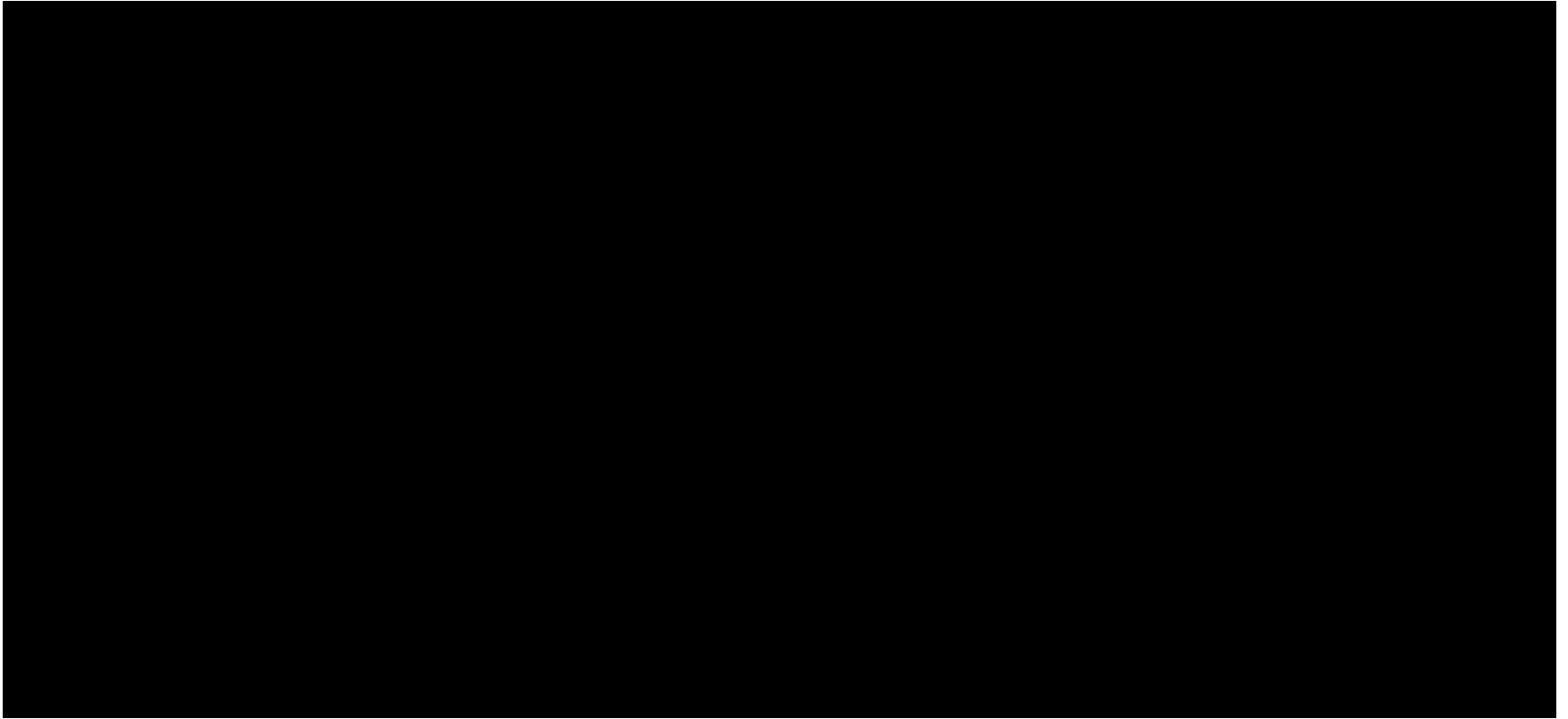
Up to 8x8 channels.

Size: 28x28 mm<sup>2</sup>.

Active area 18x18 mm<sup>2</sup> (41%).

Bialkali PC: Q.E. = 20% at  $\lambda_{\max} =$   
400 nm. Gain  $\approx 10^6$ .

# Comment choisir un PM ?



Il faut également « marier » au mieux les caractéristiques de la lumière à détecter et la réponse spectrale du photomultiplicateur.

# Evolutions du PM

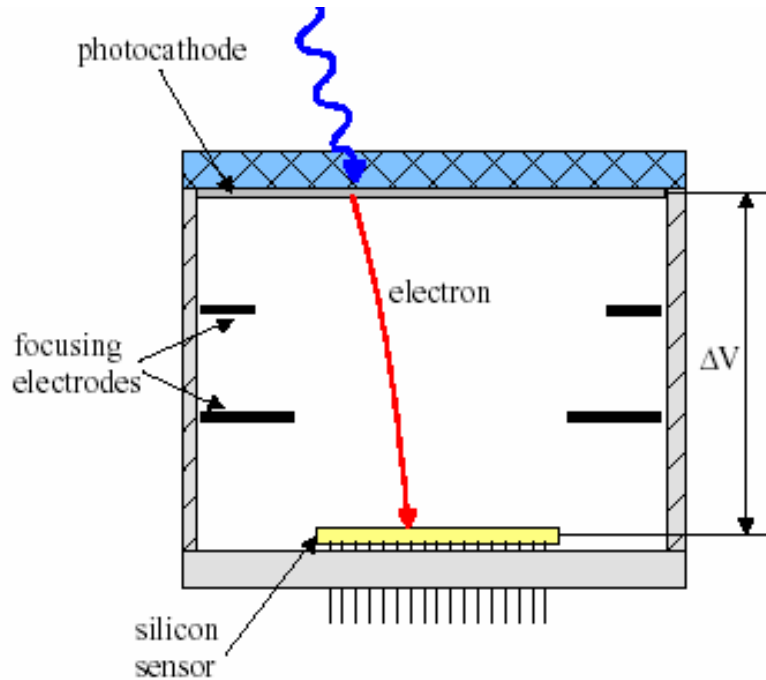


photo cathode + p.e.  
acceleration + silicon  
det. (pixel, strip, pads)

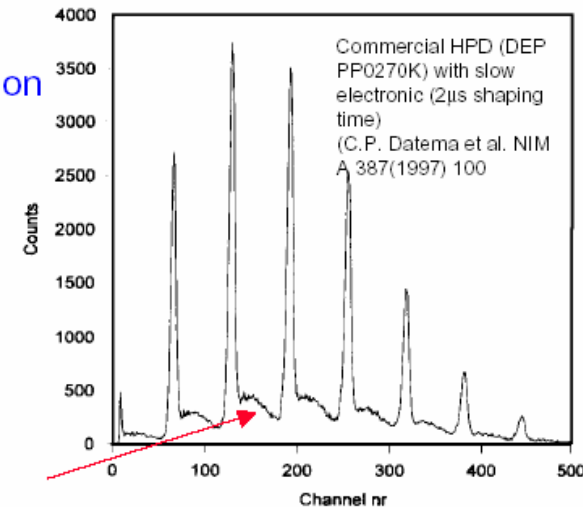
Photo cathode like in PMT,  $\Delta V$  10-20 kV

$$G = \frac{e\Delta V}{W_{Si}} = \frac{20 \text{ keV}}{3.6 \text{ eV}} \approx 5 \cdot 10^3 \quad (\text{for } \Delta V = 20 \text{ kV})$$

Single photon detection  
with high resolution

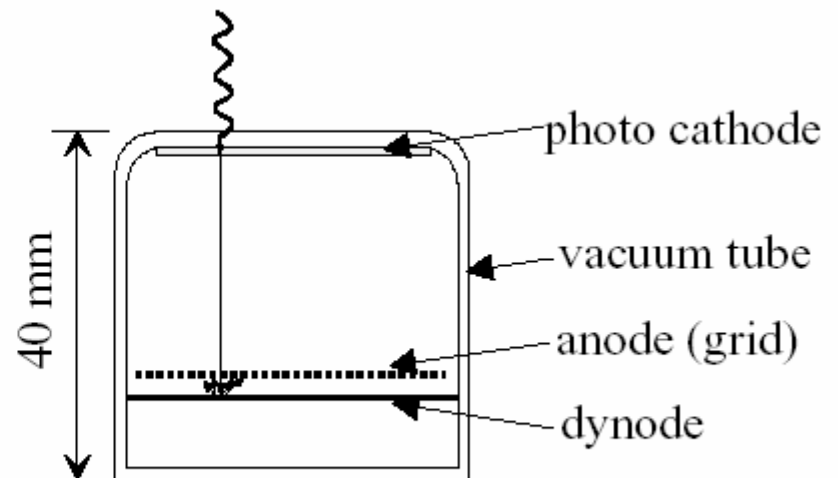
Poisson statistics  
with  $\bar{n} = 5000$  !

Background from  
electron backscattering  
from silicon surface



# Phototriodes

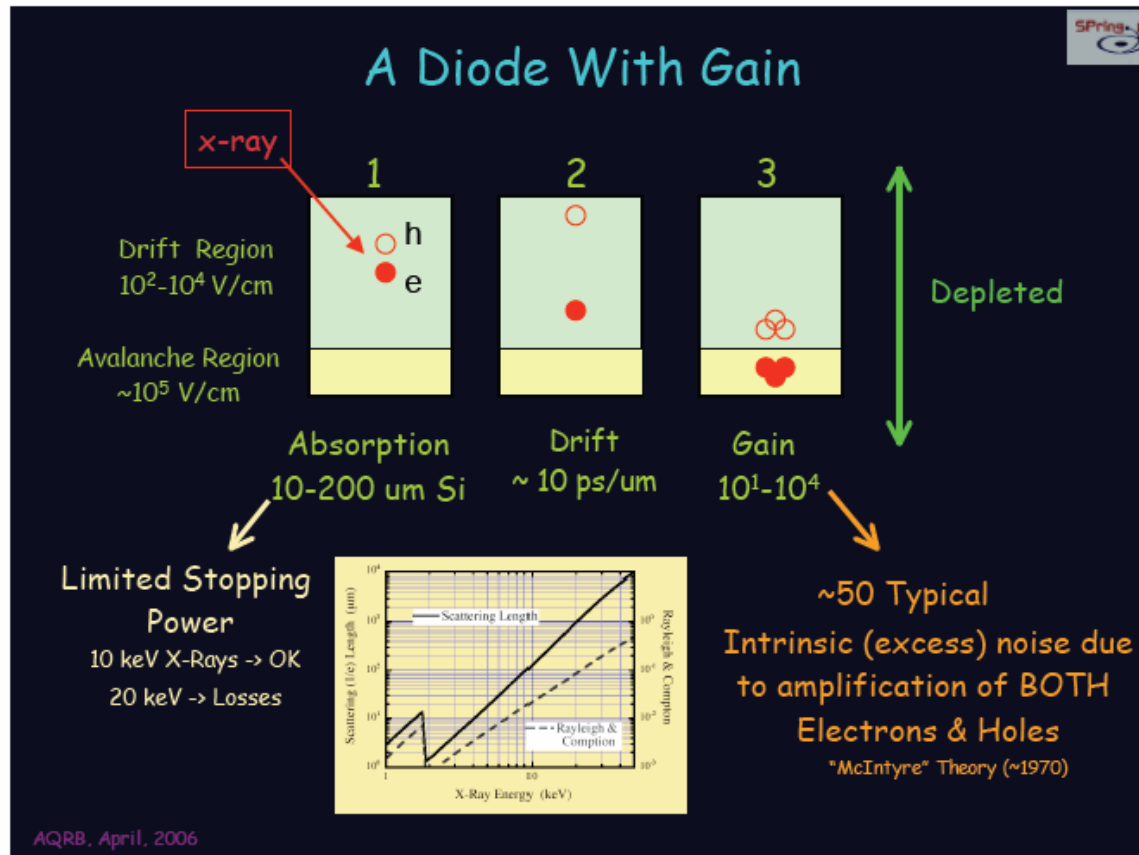
$G \approx 10$ .  
work in axial B-fields of 1T  
OPAL, DELPHI: readout of  
lead glass in endcap  
calorimeter  
 $G$  at 1T  $\approx 7-10$



IEEE NS-30 No. 1 (1983) 479

# Photodiode à avalanche (APD)

- Détection des photons par effet photo-électrique dans le Si, puis multiplication des porteurs de charge par avalanche (champ électrique interne intense). Permettent des gains de 100 à 1000



# Principles of MRS APD operation

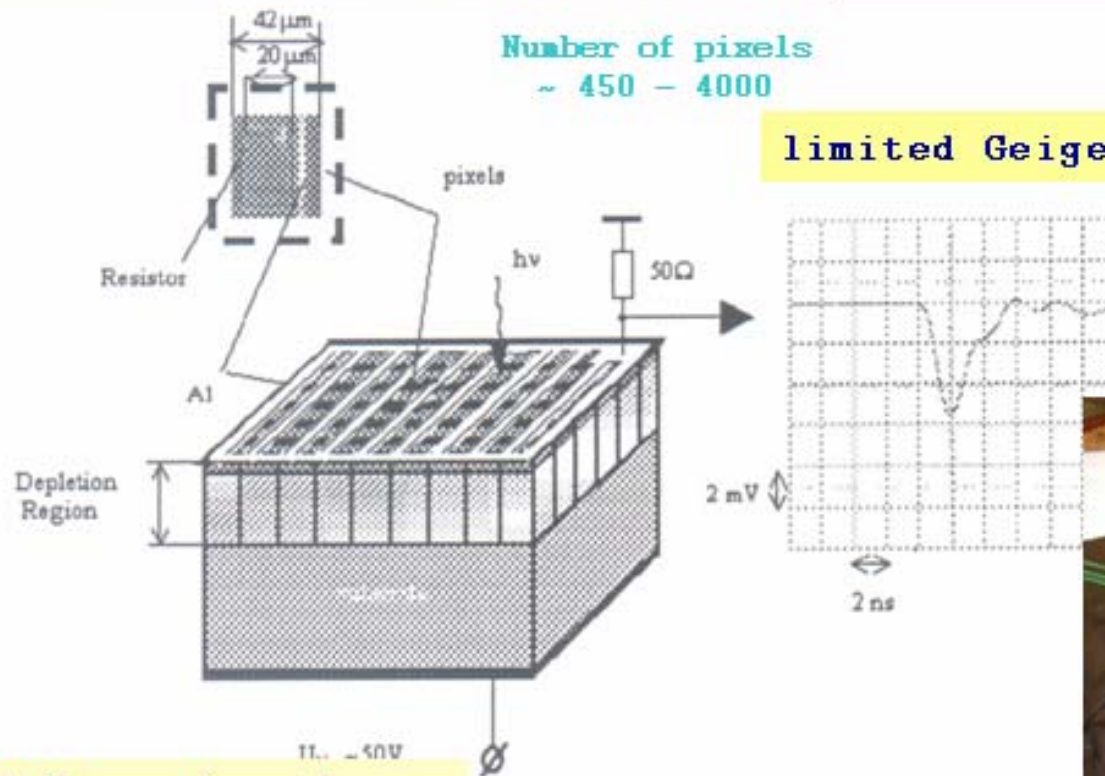
Multipixel Geiger mode APD's  
invented in Russia in 1980's

CPTA, Moscow (MRS APD)  
MePhi/PULSAR, Moscow (SiPM)  
Dubna

Number of pixels  
~ 450 - 4000

limited Geiger mode

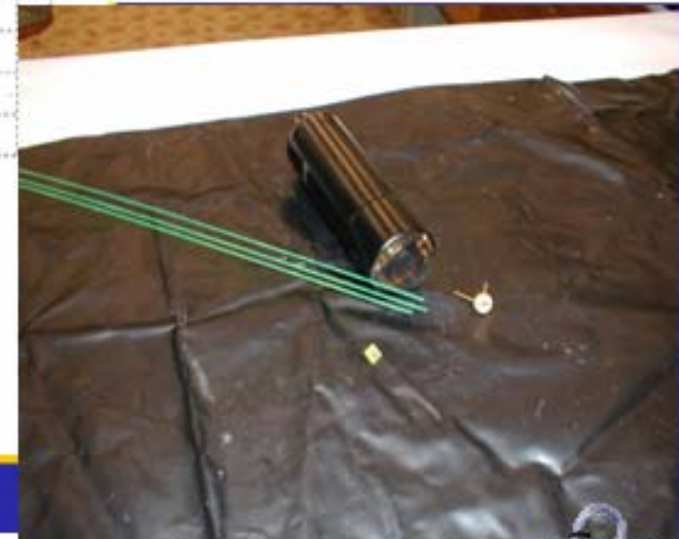
PMT: diameter 20 mm  
MRS: active area 1x1mm<sup>2</sup>  
dian 1 mm



Depletion region ~ 2μm  
Drift velocity ~ 10<sup>7</sup> cm/s  
Field ~ (2-3)x10<sup>5</sup> V/cm

$$Q_{\text{pixel}} = C_{\text{pixel}} \times \Delta V = C_{\text{pixel}} \times (V_{\text{bias}} - V_{\text{breakdown}})$$

$$C_{\text{pixel}} \sim 50 \text{ fmF} \quad \Delta V \sim \text{few volts} \rightarrow Q_{\text{pixel}} \sim 2 \times 10^6 \text{ electrons}$$



# Comparison SiPM vs PMT

See G.Collazuol talk at SORMA WEST 08 conf.

for applications of photon counting and timing at high rates

	PMT	SiPM
Reference device (eff. area)	HPK R7600 (18x18 mm <sup>2</sup> )	HPK S10362-11-50C (1x1 mm <sup>2</sup> )
Gain (G)	$\geq 10^6$	$\geq 10^6$
$\delta V/V$ for $\delta G/G=1\%$	$3 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$
$\delta T$ for $\delta G/G=1\%$	5°C	0.3°C
Max average anode current	100 $\mu$ A (350 mm <sup>2</sup> )	3 $\mu$ A (1 mm <sup>2</sup> )
Efficiency (on active area)	~25% @ 400nm ~40% (UBA)	~95% @ 400nm
Fill Factor	36%	40% to 80%
Time resolution	~300ps	50ps to 100ps
Dark noise (1 p.e.)	few kHz	0.5 MHz @room T
After-pulse (thr. @ 1 p.e.)	1 % level	10 % level
B-field immunity	No	Yes
Radiation damg.	No (also at single photon level ?)	Yes

$$\text{Gain} = C_{\text{cell}} \times \Delta V$$

20MHz limit to avoid signal pileup. Not mandatory: can use proper shaping !!!  
SiPM can stand at least x10 more rate per unit area than PMT

$$\text{Approx. } \propto \Delta V$$

cell geometry

$$\text{Approx. } \propto \Delta V^{-1}$$

$$\text{Approx. } \propto \Delta V$$

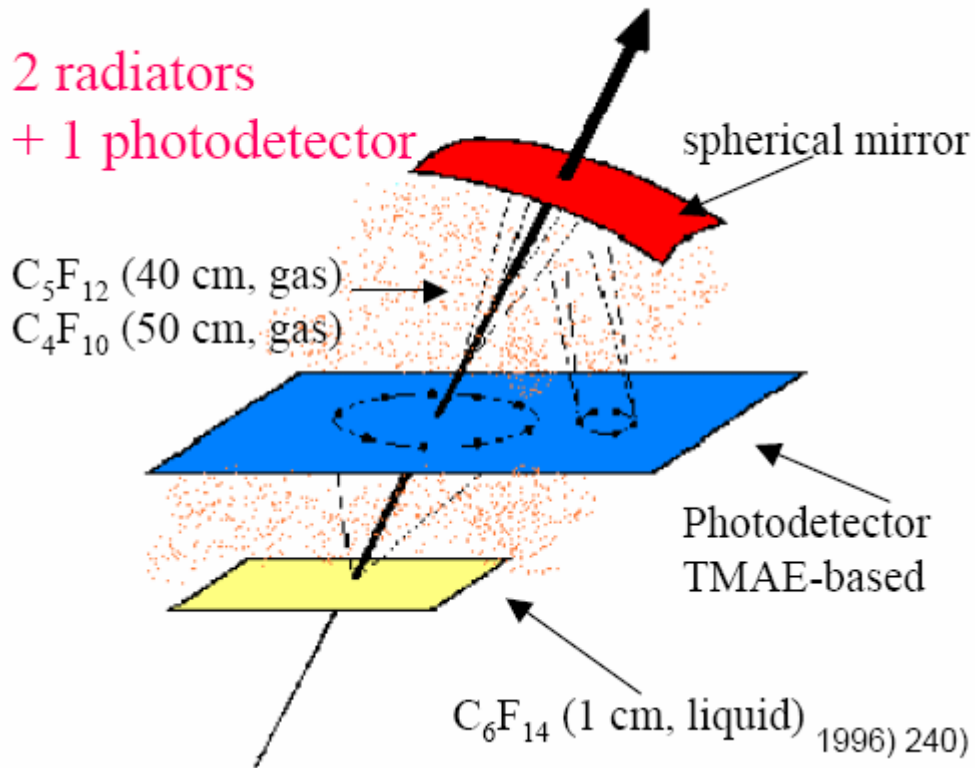
$$\text{Approx. } \propto \Delta V^2$$

$$\Delta V \text{ is the over-voltage} \\ = V_{\text{bias}} - V_{\text{breakdown}}$$



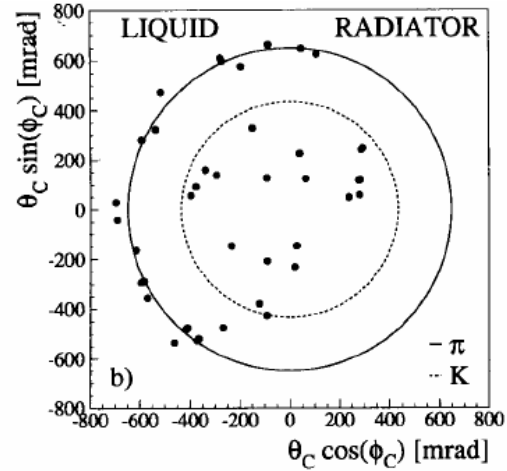
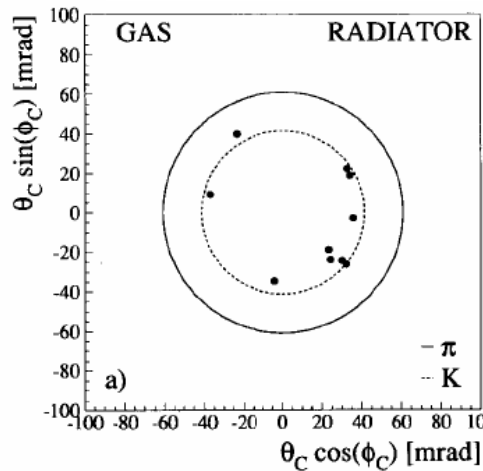
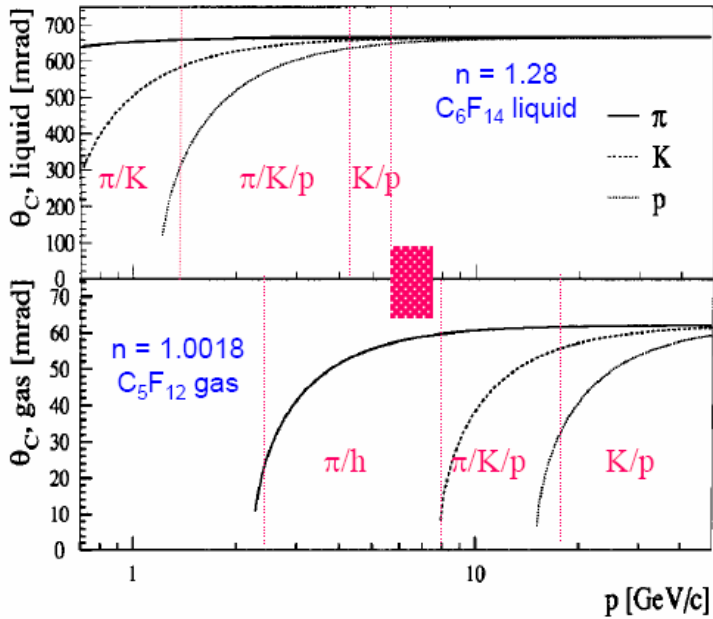
# DELPHI RICH

2 radiators  
+ 1 photodetector

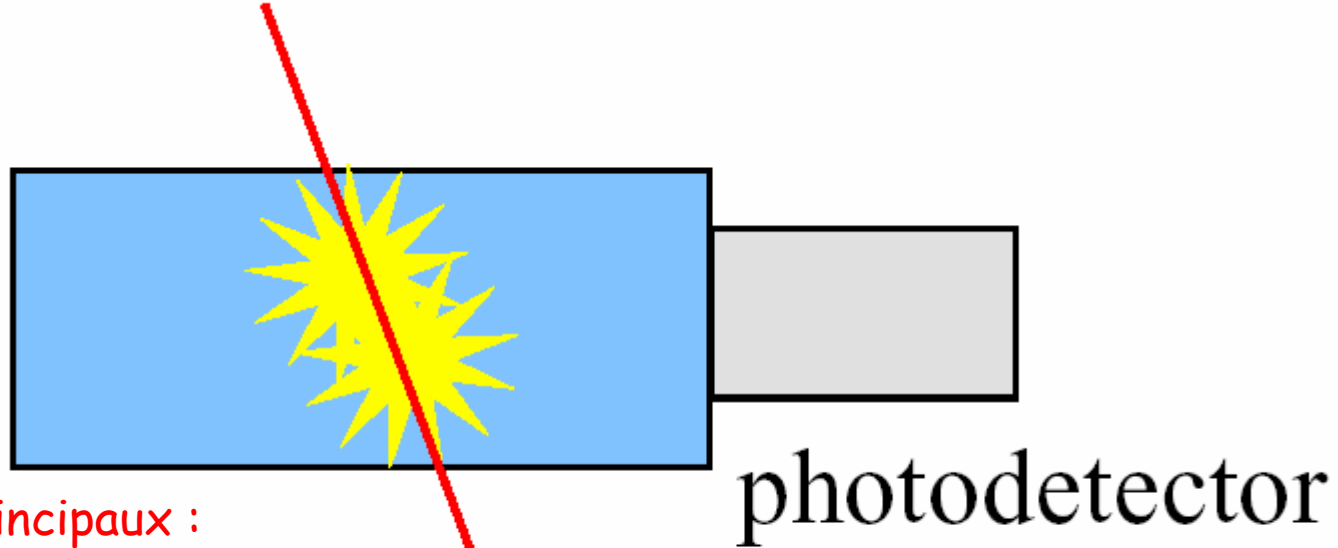


DE

$$\theta_C = \arccos\left(\frac{1}{n\beta}\right) = \arccos\left(\frac{1}{n} \cdot \frac{E}{p}\right) = \arccos\left(\frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{p}\right)$$



# Scintillateurs



Deux types principaux :

- Minéraux : denses, bon rendement, Signal lent.
- Inorganiques : légers, rendement faible, Signal rapide.

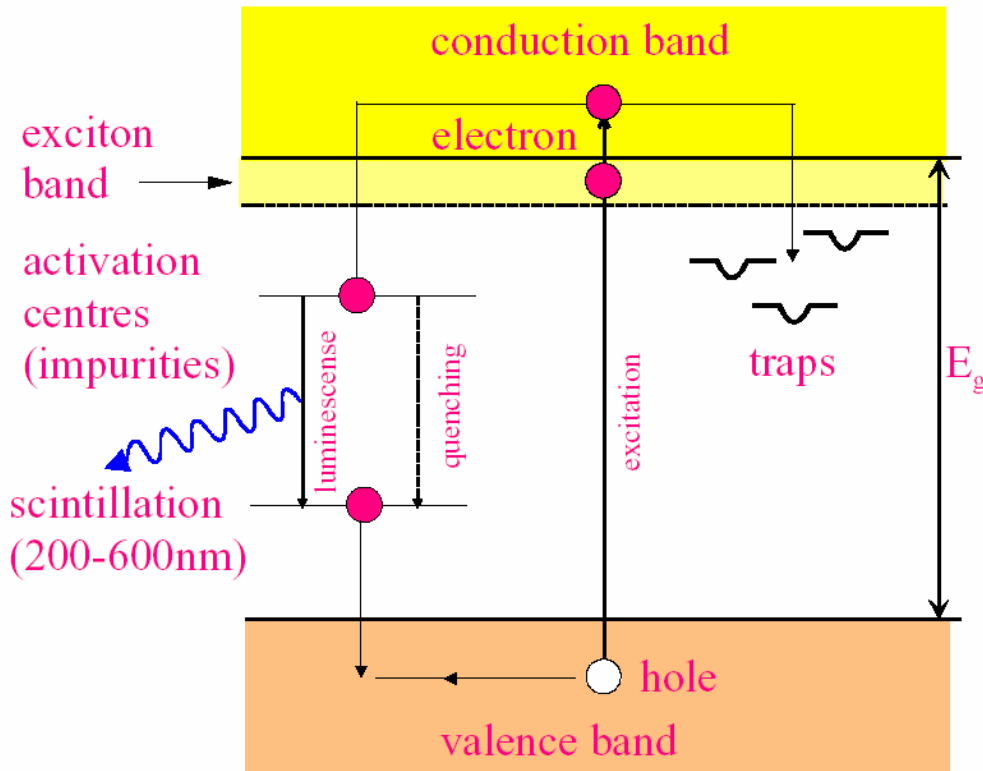
Le scintillateur convertit l'ionisation en photons visibles

Détecteurs très souples :

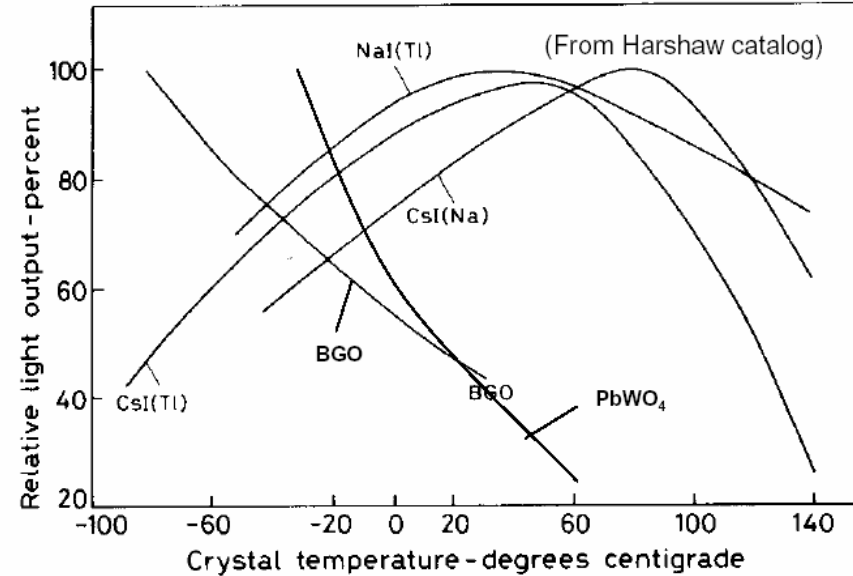
- Calorimétrie (mesure d'énergie)
- Tracking
- Mesure de temps

# Mécanismes

a. Inorganic crystalline scintillators (NaI, CsI, BaF<sub>2</sub>...)



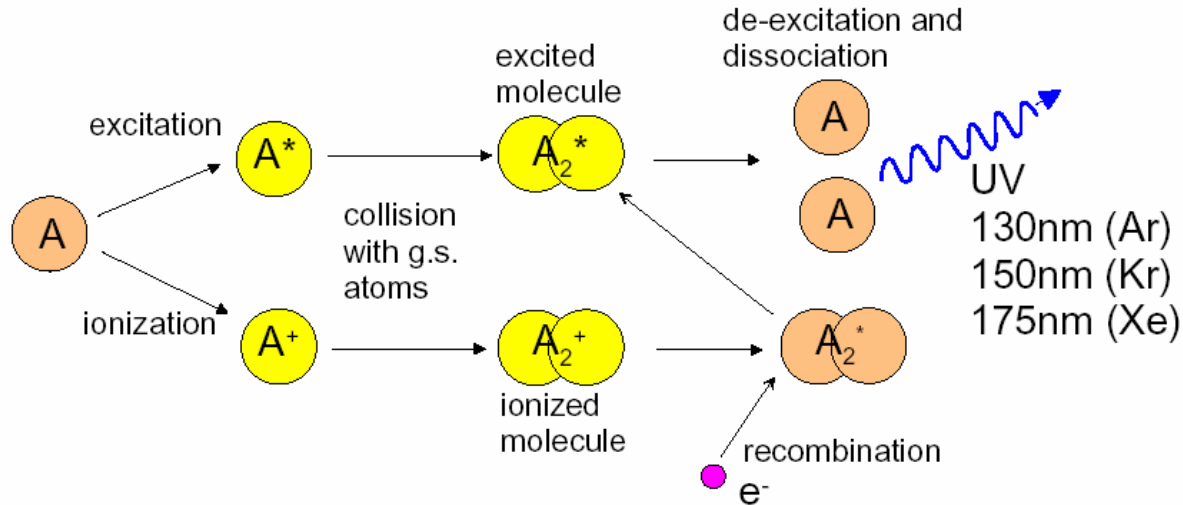
Souvent plusieurs  
Constantes de temps :  
De qq ns à 100 ms, pas  
nécessairement même  $\lambda$



Dépendance du rendement  
lumineux en la température

# Mécanismes

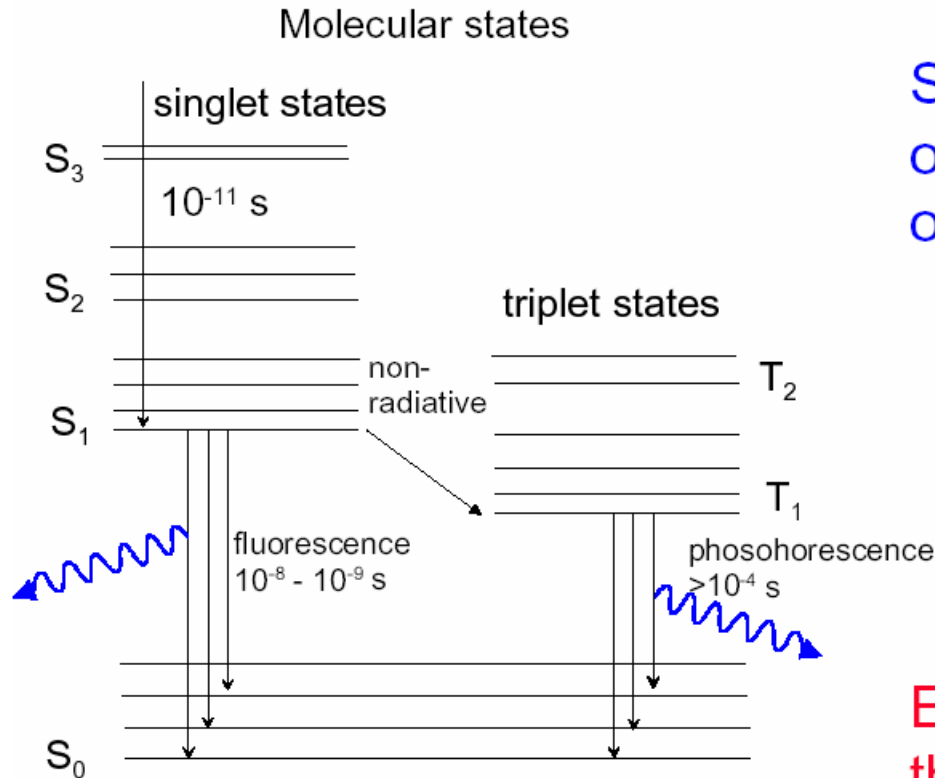
## 1b. Liquid noble gases (LAr, LXe, LKr)



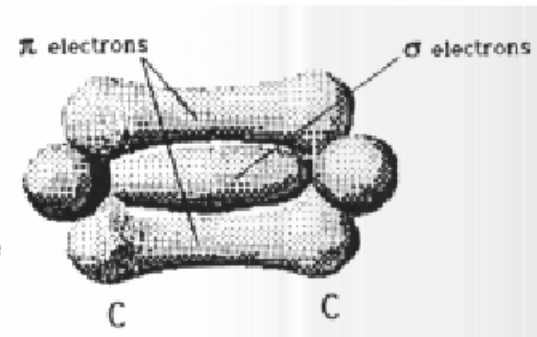
Dans ce cas aussi, deux constantes de temps : qq ns à 100-1000 ns

Pas de différence de longueur d'onde.

# Mécanismes



Scintillation is based on the 2  $\pi$  electrons of the C-C bonds.



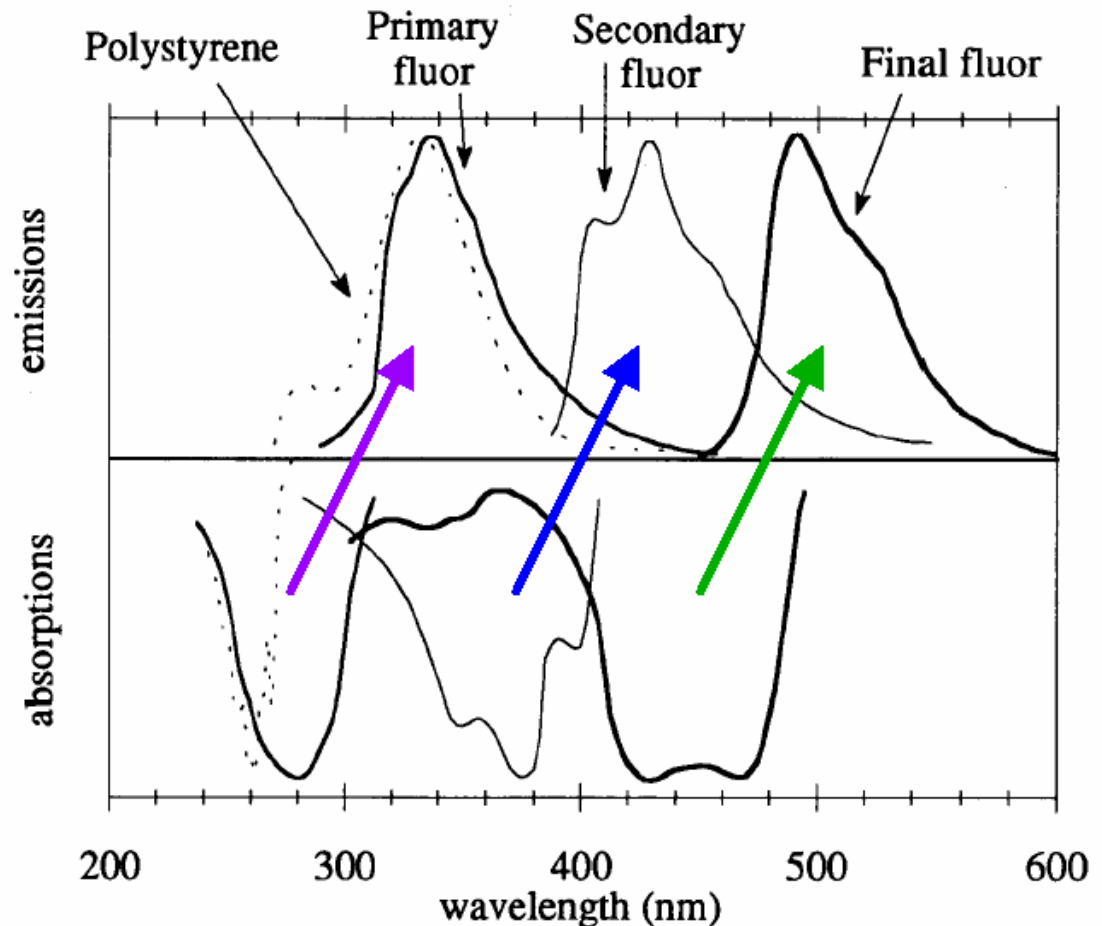
Emitted light is in the UV range.

Monocrystals: naphthalene, anthracene, p-terphenyl....

# Wavelength shifting

Schematic representation of wavelength shifting principle

(C. Zorn, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific, 1992)



Scintillateurs plastiques usuels : solvant + WLS

# Développements récents

## Summary scintillator specs

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Attenuation length at 511 keV (mm)	Photoel. effect (%)	Light yield (ph/MeV)	Decay time (ns)	$\Delta E/E$ (662 keV) %	Emiss. max  nm
NaI:Tl	3.67	29.1	17	41,000	230	6.5	410
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BGO)	7.1	10.4	40	9,000	300		480
Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce (LSO)	7.4	11.4	32	26,000	40	> 7	420
Lu <sub>2(1-x)</sub> Y <sub>2x</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce (X = 0.1) (LYSO)	7.1	12		30,000	40	> 7	420
LuAlO <sub>3</sub> :Ce (LuAP)	8.3	10.5	30	11,000	18		365
LaCl <sub>3</sub> :Ce	3.86	28.0	14.7	46,000	25 (65%)	3.5	350
LaBr <sub>3</sub> :Ce	5.07	22.3	13.1	70,000	16 (97%)	3	380
LuI <sub>3</sub> :Ce	5.6	18.2	28	90,000	6-140 (72%)	3.5	472 535

# Brilliance™ 380: LaBr<sub>3</sub>:Ce 3" x 3"

**Light yield**

70,000 photons/MeV  
(NaI:Tl 40,000 ph/MeV)

**Decay time**

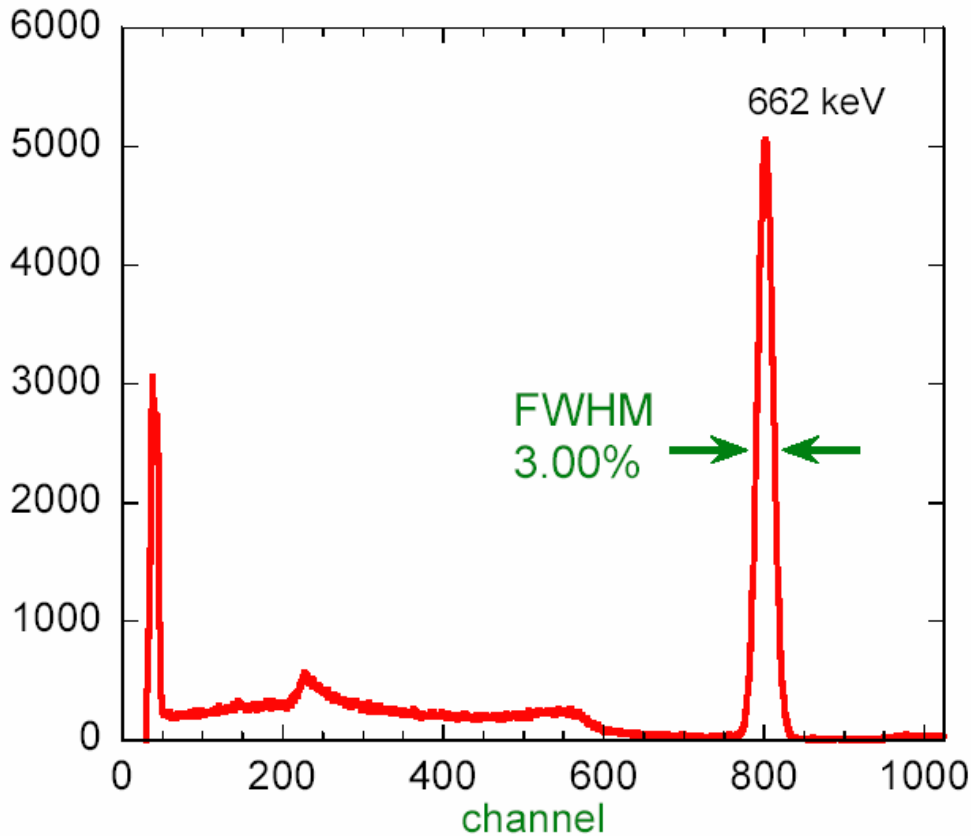
16 ns  
(NaI:Tl 230 ns)



Scintillation Material



345 cm<sup>3</sup> volume





**Table A6.2 Properties of some inorganic scintillators**

scintillator composition	density (g/cm <sup>3</sup> )	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (μs)	scintillation pulse height <sup>1)</sup>	notes	Photons/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190	2)	4 × 10 <sup>4</sup>
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	3)	
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	3)	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	3)	1.1 × 10 <sup>4</sup>
CaI(Na)	4.51	1.84	420	0.63	85	3)	
KI(Tl)	3.13	1.71	410	0.24/2.5	24	3)	1.4 × 10 <sup>4</sup>
<sup>6</sup> LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	3)	
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	1.44	435	0.9	50		6.5 × 10 <sup>3</sup> 2 × 10 <sup>3</sup>
BaF <sub>2</sub>	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8 × 10 <sup>3</sup>
CaWO <sub>4</sub>	6.12	1.92	430	0.5/20	50		
ZnWO <sub>4</sub>	7.87	2.2	480	5.0	26		
CdWO <sub>4</sub>	7.90	2.3	540	5.0	40		
CsF	4.65	1.48	390	0.005	5	3)	
CeF <sub>3</sub>	6.16	1.68	300 340	0.005 0.020	5		
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	0.2	150	4)	
GSO	6.71	1.9	440	0.060	20		
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.0004	40	4)	
YSO	4.45	1.8	420	0.035	50		
YAP	5.50	1.9	370	0.030	40		

<sup>1)</sup> relative to NaI(Tl) <sup>2)</sup> at 80 K <sup>3)</sup> hygroscopic <sup>4)</sup> polycrystalline

PbWO <sub>4</sub>	8.28	1.82	440, 530	0.01			100
-------------------	------	------	----------	------	--	--	-----

LAr	1.4	1.29 <sup>5)</sup>	120-170	0.005 / 0.860			
LKr	2.41	1.40 <sup>5)</sup>	120-170	0.002 / 0.085			
LXe	3.06	1.60 <sup>5)</sup>	120-170	0.003 / 0.022			4 × 10 <sup>4</sup>

<sup>5)</sup> at 170 nm

# En résumé Scintillateurs inorganiques

**Table A6.3 Properties of some organic scintillators**

scintillator	density (g/cm <sup>3</sup> )	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (ns)	scintillation pulse height <sup>1)</sup>	H/C ratio <sup>2)</sup>	yield/ NaI
<b>Monocrystals</b>							
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800	0.5
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714	
trans-stilbene	1.16	1.58	384	3-8	46	0.857	
p-terphenyl	1.23		391	6-12	30	0.778	
<b>Plastics <sup>3)</sup></b>							
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105	
NE 104	1.032	1.58	405	1.8	68	1.100	
NE 110	1.032	1.58	437	3.3	60	1.105	
NE 111	1.032	1.58	370	1.7	55	1.096	
<b>Plastics <sup>4)</sup></b>							
BC-400	1.032	1.581	423	2.4	65	1.103	
BC-404	1.032	1.58	408	1.8	68	1.107	
BC-408	1.032	1.58	425	2.1	64	1.104	
BC-412	1.032	1.58	434	3.3	60	1.104	
BC-414	1.032	1.58	392	1.8	68	1.110	
BC-416	1.032	1.58	434	4.0	50	1.110	
BC-418	1.032	1.58	391	1.4	67	1.100	
BC-420	1.032	1.58	391	1.5	64	1.100	
BC-422	1.032	1.58	370	1.6	55	1.102	
BC-422Q	1.032	1.58	370	0.7	11	1.102	
BC-428	1.032	1.58	480	12.5	50	1.103	
BC-430	1.032	1.58	580	16.8	45	1.108	
BC-434	1.049	1.58	425	2.2	60	0.995	

En résumé  
Scintillateurs  
organiques

<sup>1)</sup> relative to anthracene

<sup>2)</sup> ratio of hydrogen to carbon atoms

<sup>3)</sup> Nuclear Enterprises Ltd. Sighthill, Edinburgh, U.K.

<sup>4)</sup> Bicron Corporation, Newbury, Ohio, USA

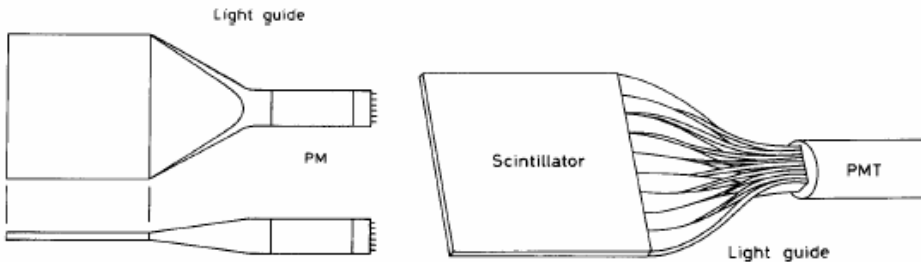
# Utilisations

- Inorganiques :
  - Détection de particules chargées
  - Calorimétrie
  - Spectroscopie de photons
- Organiques :
  - Détection de neutrons
  - Mesure de temps
  - Détection de particules chargées

# Lecture d'un scintillateur

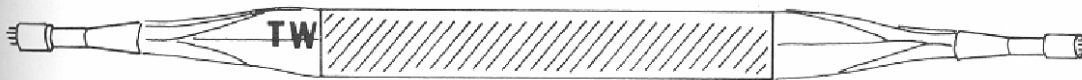
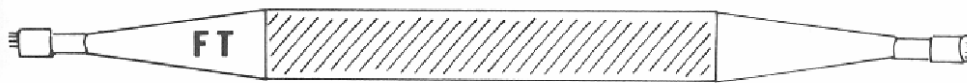
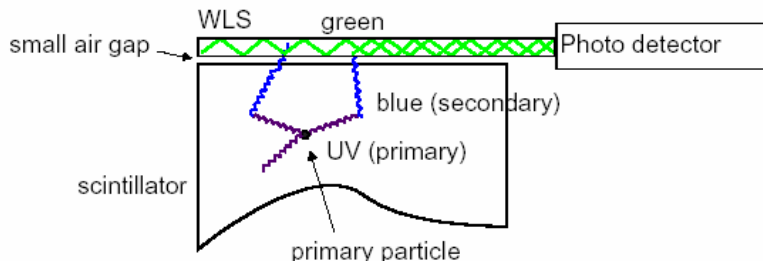
Par guides de lumière (conduisent la lumière par réflexion totale)

Par barres de WLS  
Adaptent aussi le spectre du scintillateur à la photocathode



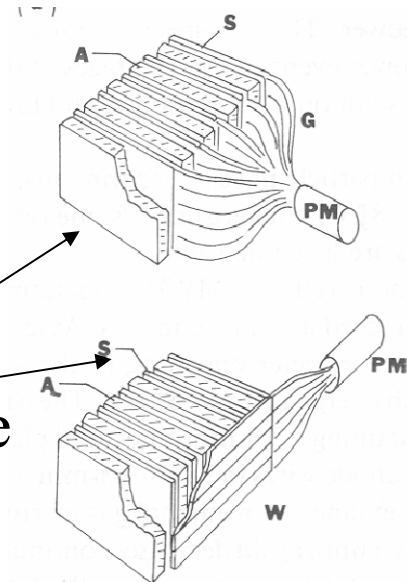
"fish tail"

adiabatic

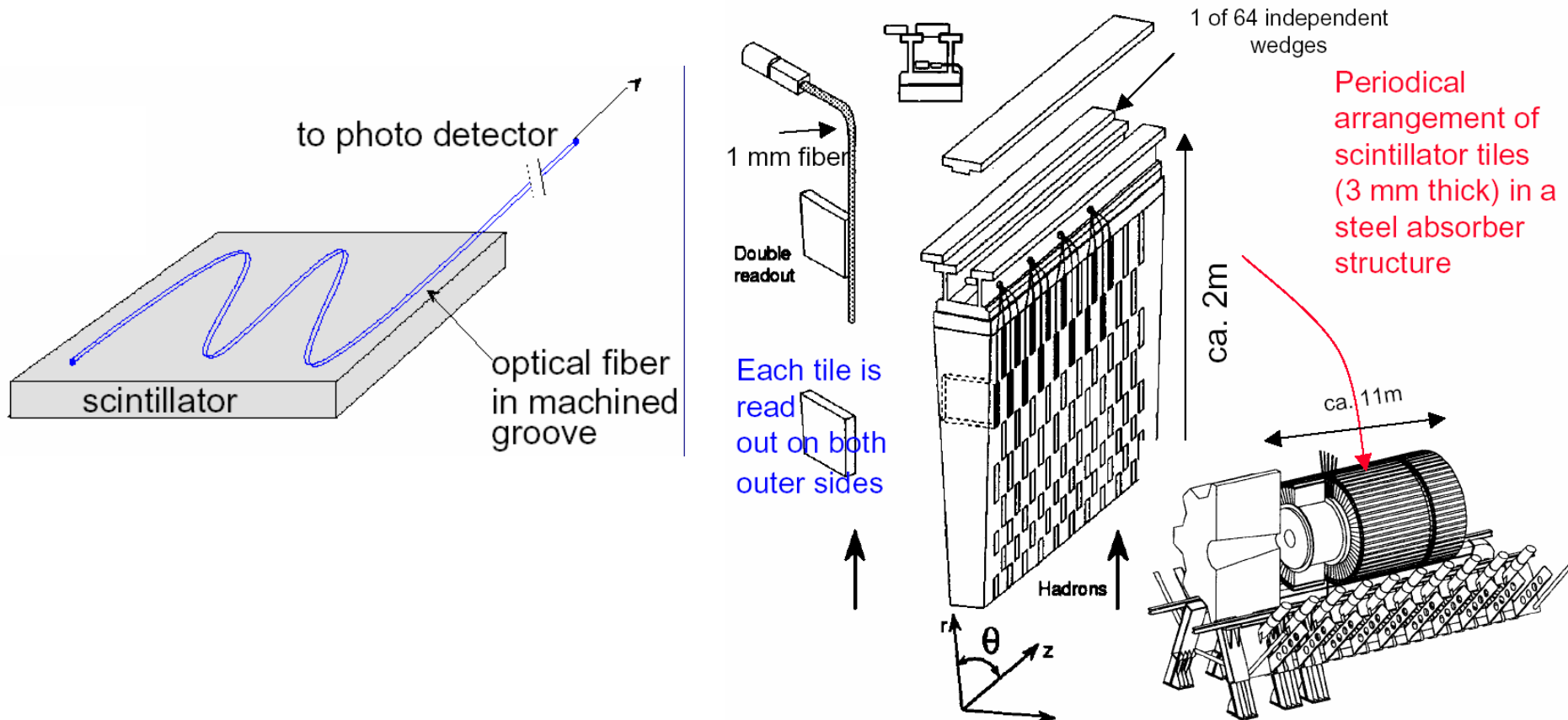


Mesure du temps :  
Résolution de 60 ps

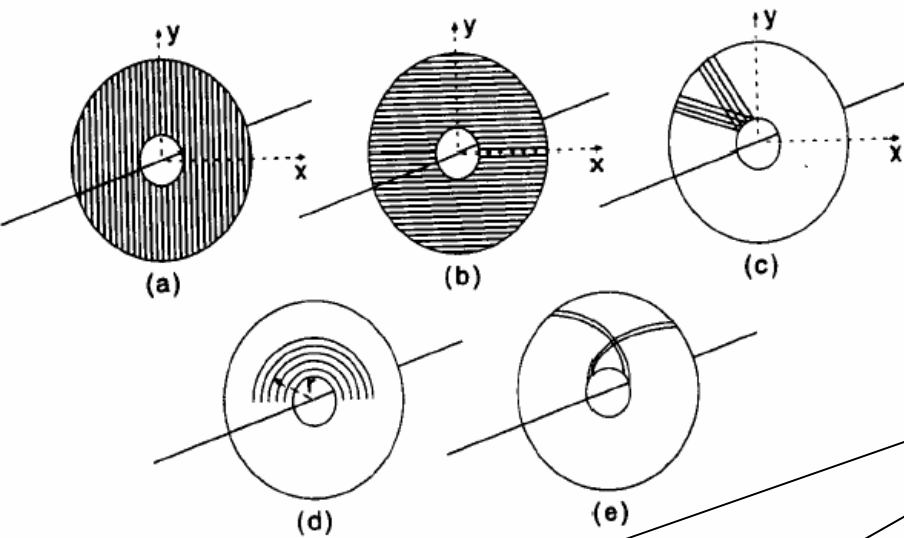
Assemblage typique  
de calorimètre



# Lecture par fibre optique

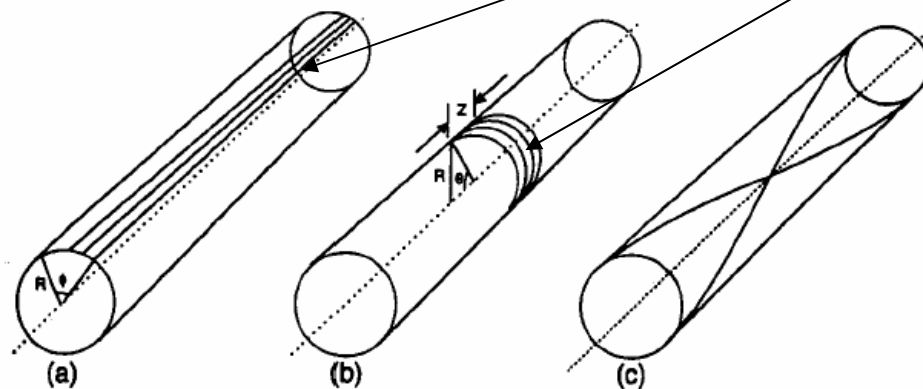


# Tracking par fibres scintillantes



Planar geometries  
(end cap)

Fibres capillaires,  
remplies de scintillateur  
liquide



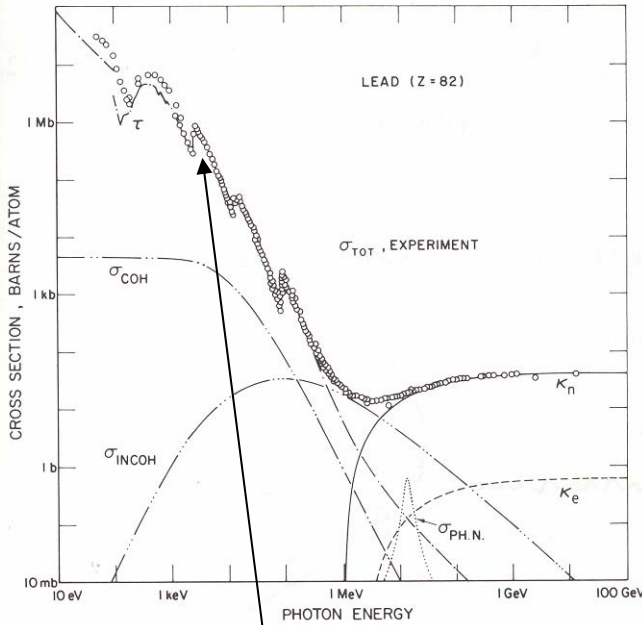
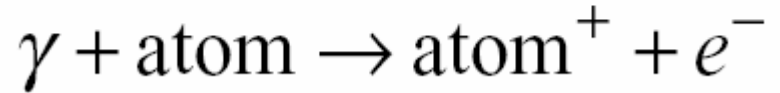
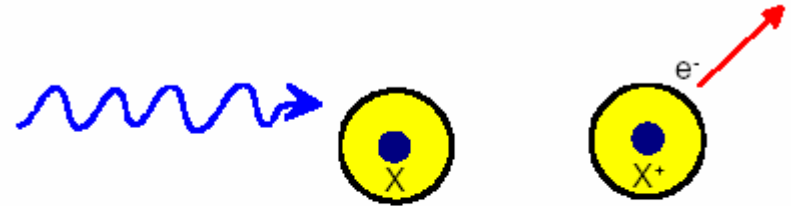
Circular geometries  
(barrel)

- a) axial
- b) circumferential
- c) helical

# Interaction des photons avec la matière

- Processus possibles :
- Effet photo-électrique
- Effet Compton
- Création de paires

# Effet photo-électrique



$$\sigma_{photo}^K = \left( \frac{32}{\epsilon^7} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha^4 Z^5 \sigma_{Th}^e \quad \epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \quad \sigma_{Th}^e = \frac{8}{3} \pi r_e^2 \quad (\text{Thomson})$$

A haute énergie ( $\epsilon \gg 1$ )

$$\sigma_{photo}^K = 4\pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \frac{1}{\epsilon}$$

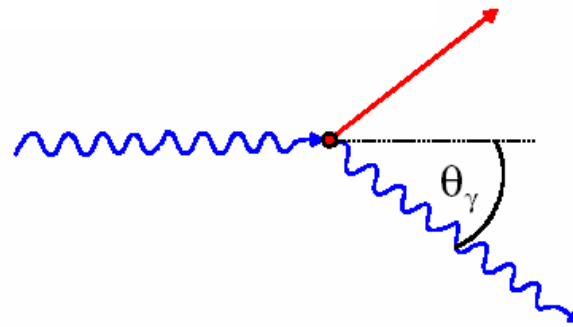
$$\sigma_{photo} \propto Z^5$$

Modulations à basse énergie (effets des couches atomiques)



# Effet Compton

$$\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$$

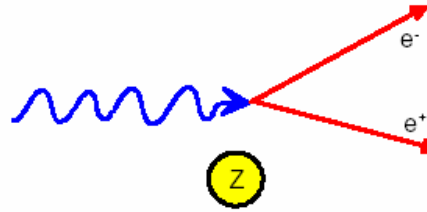


$$E'_\gamma = E_\gamma \frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos\theta_\gamma)}$$

Section efficace ( $\Leftrightarrow$  probabilité) :  $\sigma_c^e \propto \frac{\ln \varepsilon}{\varepsilon}$

Dominée par les électrons atomiques  $\sigma_c^{atomic} = Z \cdot \sigma_c^e$

# Création de paires



Seuil :  $E_\gamma \geq 2m_e c^2$

Ne peut se produire que dans le champ coulombien créé par un noyau ou un électron

$$\sigma_{pair} \approx 4\alpha r_e^2 Z^2 \left( \frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$\approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

$$\approx \frac{A}{N_A} \frac{1}{\lambda_{pair}}$$

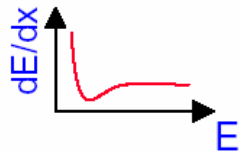
$$\lambda_{pair} = \frac{9}{7} X_0$$

Approximation à haute énergie :  
Section efficace constante

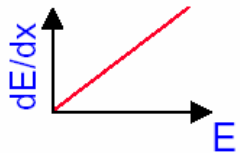
# Interactions électromagnétiques en résumé

$e^+ / e^-$

- Ionisation

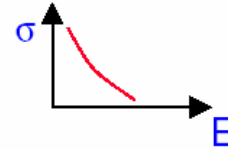


- Bremsstrahlung

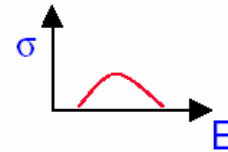


$\gamma$

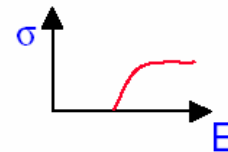
- Photoelectric effect



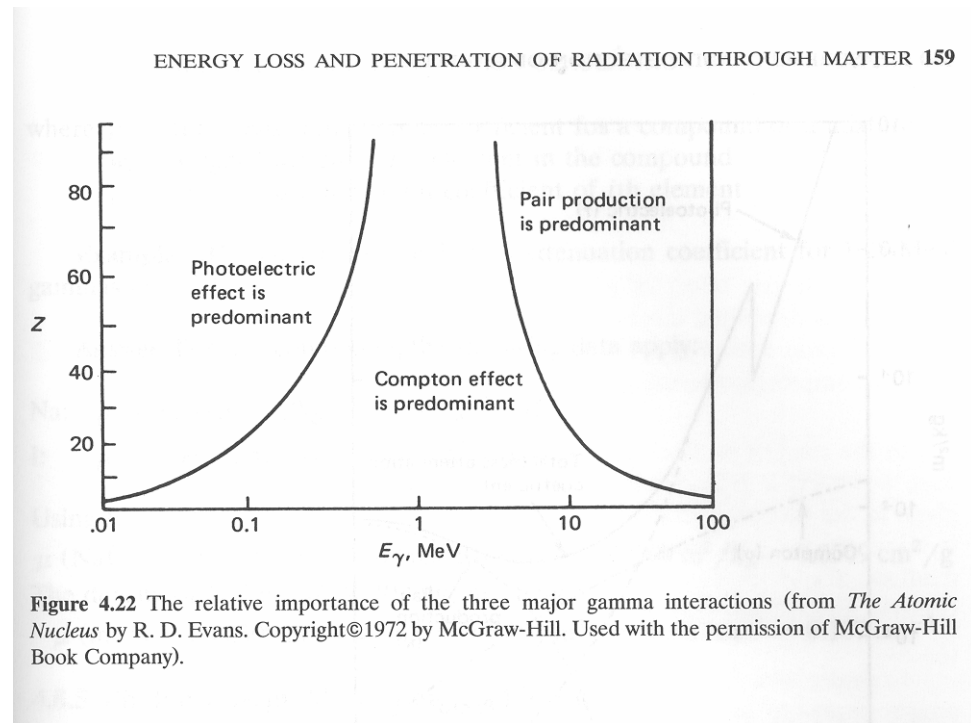
- Compton effect



- Pair production

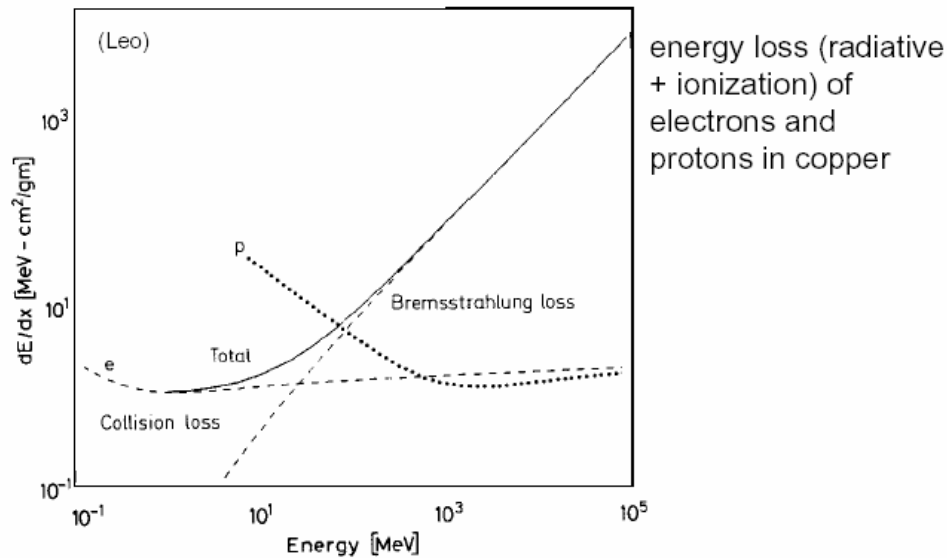


# Importance relative des processus (photons)



A haute énergie, la production de paires est le mécanisme dominant pour les photons.

# Importance relative des processus (électrons)



## Critical energy $E_c$

$$\left. \frac{dE}{dx}(E_c) \right|_{Brems} = \left. \frac{dE}{dx}(E_c) \right|_{ion}$$

Formules empiriques

For electrons one finds approximately:

$$E_c^{solid+liq} = \frac{610 MeV}{Z+1.24} \quad E_c^{gas} = \frac{710 MeV}{Z+1.24}$$

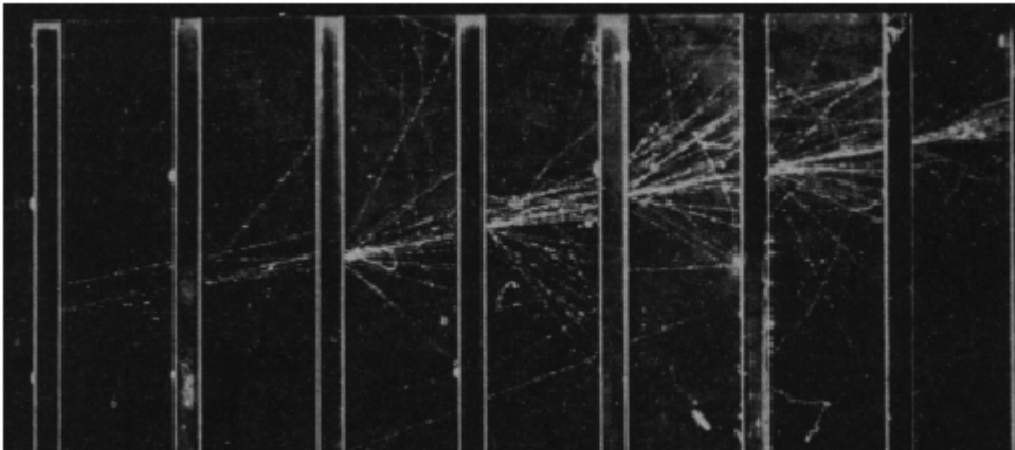
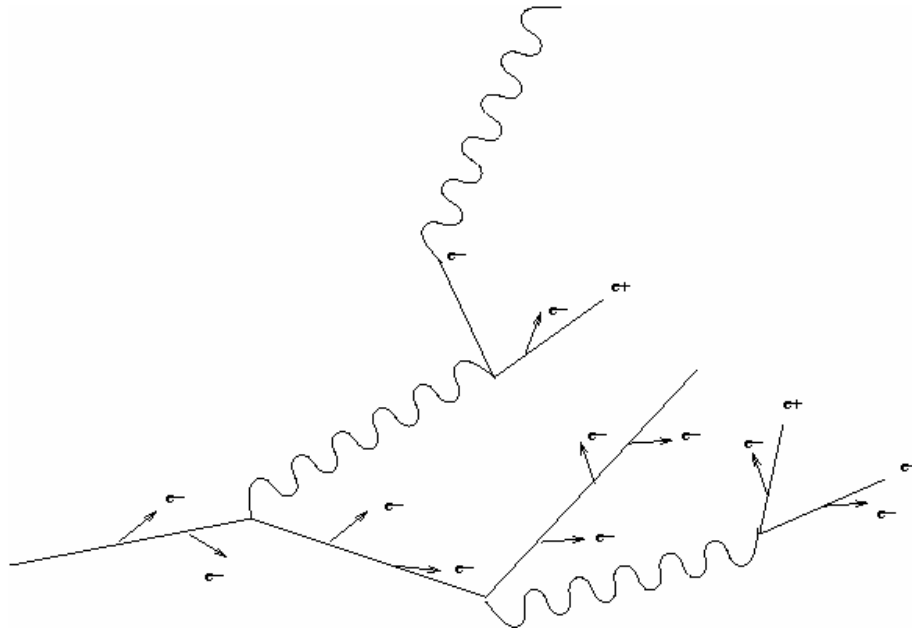
density effect of  $dE/dx(ionisation)$  !

$E_c(e^-)$  in Fe(Z=26) = 22.4 MeV

# La calorimétrie

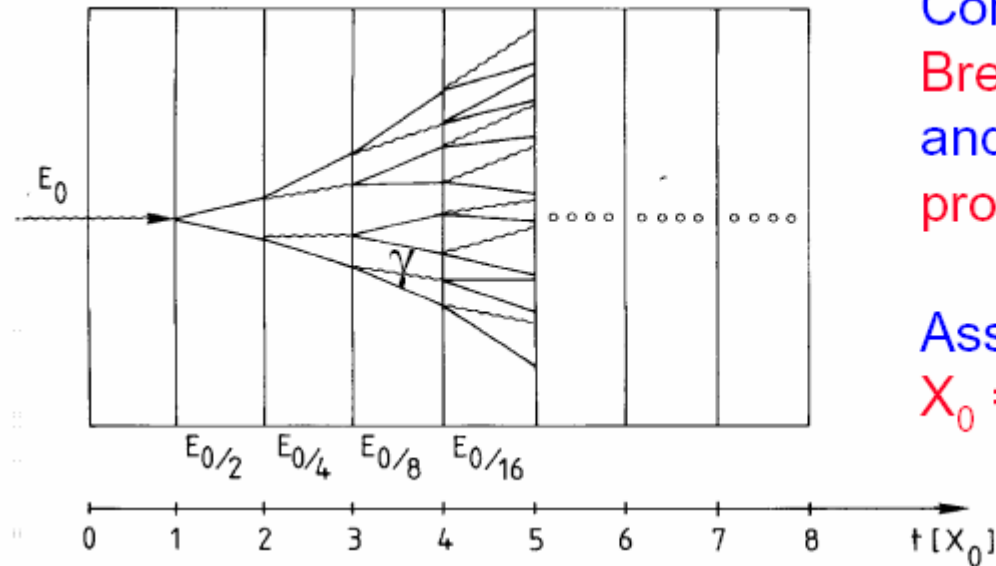
- Calorimétrie électromagnétique
- Calorimétrie hadronique
- Un calorimètre est un détecteur au sein duquel les particules déposent l'intégralité de leur énergie. Celle-ci est (partiellement) convertie en un signal proportionnel à l'énergie de la particule initiale

# Développement des gerbes électromagnétiques



Electron shower in a cloud chamber with lead absorbers

# Modélisation



Consider only  
Bremsstrahlung  
and pair  
production.

Assume:  
 $X_0 = \lambda_{\text{pair}}$

$$N(t) = 2^t \quad E(t)/\text{particle} = E_0 \cdot 2^{-t}$$

Process continues until  $E(t) < E_c$

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2} \quad N^{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{(t_{\text{max}}+1)} - 1 \approx 2 \cdot 2^{t_{\text{max}}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

After  $t = t_{\text{max}}$  the dominating processes are ionization,  
Compton effect and photo effect → absorption.



# Description pratique du développement des gerbes

Longitudinal shower development:  $\frac{dE}{dt} \propto t^\alpha e^{-t}$

Shower maximum at  $t_{\max} = \ln \frac{E_0}{E_c} \frac{1}{\ln 2}$

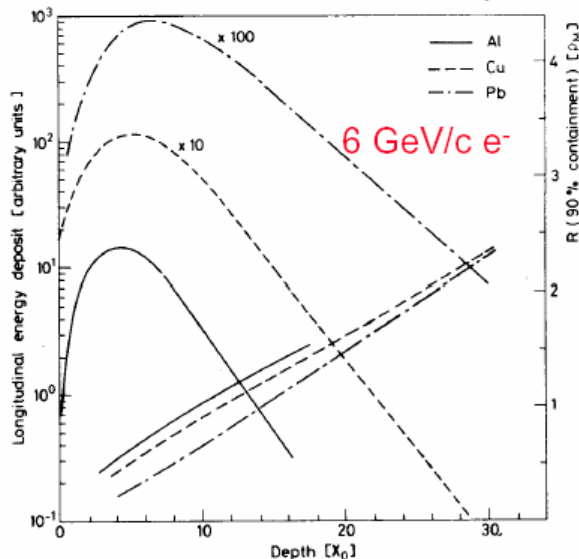
95% containment  $t_{95\%} \approx t_{\max} + 0.08Z + 9.6$

Size of a calorimeter grows only logarithmically with  $E_0$

Transverse shower development: 95% of the shower cone is located in a cylinder with radius  $2 R_M$

$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad [g/cm^2] \quad \text{Molière radius}$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g.cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$



Longitudinal and transverse development scale with  $X_0, R_M$

(C. Fabjan, T. Ludlam, CERN-EP/82-37)

## 6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

**Table 6.1.** Revised May 2002 by D.E. Groom (LBNL). Gases are evaluated at 20°C and 1 atm (in parentheses) or at STP [square brackets]. Densities and refractive indices without parentheses or brackets are for solids or liquids, or are for cryogenic liquids at the indicated boiling point (BP) at 1 atm. Refractive indices are evaluated at the sodium D line. Data for compounds and mixtures are from Refs. 1 and 2. Further materials and properties are given in Ref. 3 and at <http://pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties>.

Material	Z	A	(Z/A)	Nuclear collision length $\lambda_C$ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	Nuclear interaction length $\lambda_I$ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	$dE/dx _{\min}$ <sup>b</sup> { $\frac{\text{MeV}}{\text{g}/\text{cm}^2}$ }	Radiation length <sup>c</sup> $X_0$ [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ] [cm]	Density { $\text{g}/\text{cm}^3$ } {( $\text{g}/\ell$ ) for gas}	Liquid boiling point at 1 atm(K)	Refractive index $n$ { $(n-1)\times 10^6$ } for gas}
H <sub>2</sub> gas	1	1.00794	0.50212	43.3	50.8	(4.103)	61.28 <sup>d</sup> (731000)	(0.0838)(0.0850)	—	[130.2]
H <sub>2</sub> liquid	1	1.00794	0.50212	43.3	50.8	4.034	61.28 <sup>d</sup>	0.0708	20.39	1.112
D <sub>2</sub>	1	2.0140	0.49652	45.7	54.7	(2.062)	122.4	0.169(0.179)	23.65	1.128 [138]
He	2	4.002602	0.49968	49.9	65.1	(1.537)	94.32	0.1249(0.1788)	4.224	1.024 [34.9]
Li	3	6.941	0.43221	54.6	73.4	1.639	82.76	0.534	—	—
Be	4	9.012182	0.44384	55.8	75.2	1.594	85.19	35.28	1.848	—
C	6	12.011	0.49964	80.2	86.3	1.745	42.70	18.8	2.265 <sup>e</sup>	—
N <sub>2</sub>	7	14.00674	0.49976	81.4	87.8	(1.825)	37.99	47.1	0.807(1.250)	77.36 1.205 [998]
O <sub>2</sub>	8	15.9994	0.50002	83.2	91.0	(1.801)	34.24	30.0	1.141[1.428]	90.18 1.22 [996]
F <sub>2</sub>	9	18.9984032	0.47372	85.5	95.3	(1.675)	32.93	21.85	1.607[1.696]	85.24 [195]
Ne	10	20.1797	0.49655	88.1	96.6	(1.724)	28.94	24.0	1.204(0.9006)	27.09 1.092 [37.1]
Al	13	26.981538	0.48181	70.6	106.4	1.615	24.01	8.9	2.70	—
Si	14	28.0855	0.49848	70.6	106.0	1.664	21.82	9.26	2.33	3.95
Ar	18	35.948	0.49069	76.4	117.2	(1.519)	19.55	14.0	1.306[1.782]	87.28 1.233 [283]
Ti	22	47.867	0.48948	79.9	124.9	1.476	16.17	3.56	4.54	—
Fe	26	55.845	0.46566	82.8	131.9	1.451	13.84	1.76	7.87	—
Cu	29	63.546	0.46536	85.6	134.9	1.403	12.86	1.43	8.96	—
Ge	32	72.61	0.44071	88.3	140.5	1.371	12.25	2.20	5.323	—
Sn	50	118.710	0.42120	100.2	163	1.264	8.82	1.21	7.31	—
Xe	54	131.29	0.41130	102.8	169	(1.255)	8.48	2.87	2.963[5.858]	165.1 [701]
W	74	183.84	0.40260	110.3	185	1.145	6.76	0.26	19.3	—
Pt	78	195.08	0.39984	113.3	189.7	1.129	6.54	0.205	21.45	—
Pb	82	207.2	0.39675	116.2	194	1.123	6.37	0.56	11.35	—
U	92	238.0289	0.38651	117.0	199	1.082	6.00	$\approx 0.32$	$\approx 18.95$	—
Air, (20°C, 1 atm.), [STP]			0.49919	82.0	90.0	(1.815)	36.66	[30420]	(1.205)[1.2931]	78.8 (273) [293]
H <sub>2</sub> O			0.55509	80.1	83.6	1.591	36.08	36.1	1.00	373.15 1.33
CO <sub>2</sub> gas			0.49989	82.4	89.7	(1.819)	36.2	[18310]	[1.977]	[410]
CO <sub>2</sub> solid (dry ice)			0.49989	82.4	89.7	1.787	36.2	23.2	1.663	sublimes —
Shielding concrete <sup>l</sup>			0.50274	87.4	99.9	1.711	26.7	10.7	2.5	—
SiO <sub>2</sub> (fused quartz)			0.49926	86.5	97.4	1.699	27.05	12.3	2.20 <sup>g</sup>	1.468
Dimethyl ether, (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O			0.54778	65.4	82.9	—	38.89	—	—	248.7 —
Methane, CH <sub>4</sub>			0.62333	54.8	73.4	(2.417)	46.22	[54850]	0.4224(0.717)	111.7 [444]
Ethane, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>			0.59861	55.8	75.7	(2.304)	45.47	[34035]	0.609(1.356) <sup>h</sup>	184.5 (1.038) <sup>h</sup>
Propane, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>			0.58962	56.2	76.5	(2.262)	45.20	—	(1.879)	231.1 —
Isobutane, (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>			0.58496	56.4	77.0	(2.230)	45.07	[16930]	[2.67]	261.42 [1900]
Octane, liquid, CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> CH <sub>3</sub>			0.57778	56.7	77.7	2.123	44.86	63.8	0.703	308.8 1.307
Paraffin wax, CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>n=25</sub> CH <sub>3</sub>			0.57275	56.9	78.2	2.087	44.71	48.1	0.93	—
Nylon, type 6 <sup>i</sup>			0.54790	58.5	81.5	1.974	41.84	36.7	1.14	—
Polycarbonate (Lexan) <sup>j</sup>			0.52937	59.5	83.9	1.886	41.46	34.6	1.20	—
Polyethylene terephthalate (Mylar) <sup>k</sup>			0.52037	60.2	85.7	1.848	39.96	28.7	1.39	—
Polyethylene <sup>l</sup>			0.57034	57.0	78.4	2.076	44.64	$\approx 47.9$	0.92–0.95	—
Polyimide film (Kapton) <sup>m</sup>			0.51264	60.3	85.8	1.820	40.56	28.6	1.42	—
Lucite, Plexiglas <sup>n</sup>			0.53037	59.3	83.0	1.929	40.49	$\approx 34.4$	1.16–1.20	$\approx 1.49$
Polystyrene, scintillator <sup>o</sup>			0.53768	58.5	81.9	1.936	43.72	42.4	1.032	1.581
Polytetrafluoroethylene (Teflon) <sup>p</sup>			0.47992	64.2	93.0	1.671	34.84	15.8	2.30	—
Polyvinyltoluene, scintillator <sup>q</sup>			0.54155	58.3	81.5	1.966	43.83	42.5	1.032	—
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			0.49038	67.0	98.9	1.647	27.94	7.04	3.97	1.761
Barium fluoride (BaF <sub>2</sub> )			0.42207	92.0	145	1.303	9.91	2.05	4.89	1.66
Bismuth germanate (BGO) <sup>r</sup>			0.42665	98.2	157	1.251	7.97	1.12	7.1	2.15
Cesium iodide (CsI)			0.41569	102	167	1.243	8.39	1.85	4.53	1.80
Lithium fluoride (LiF)			0.46262	62.2	88.2	1.614	39.25	14.91	2.632	1.392
Sodium fluoride (NaF)			0.47632	66.9	98.3	1.69	29.87	11.68	2.558	1.336
Sodium iodide (NaI)			0.42937	94.6	151	1.305	9.49	2.59	3.67	1.775
Silica Aerogel <sup>s</sup>			0.50063	66.3	96.9	1.740	27.25	136@ $\rho=0.2$	0.04–0.6	1.0+0.21 $\rho$
NEMA G10 plate <sup>t</sup>			—	62.6	90.2	1.87	33.0	19.4	1.7	—

# Résolution en énergie

$$N^{total} \propto \frac{E_0}{E_c} \quad \text{total number of track segments}$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sigma(N)}{N} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \propto \frac{1}{\sqrt{E_0}} \quad \text{holds also for hadron calorimeters}$$

Also spatial and angular resolution scale like  $1/\sqrt{E}$

Relative energy resolution of a calorimeter improves with  $E_0$

More general:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$

Stochastic term

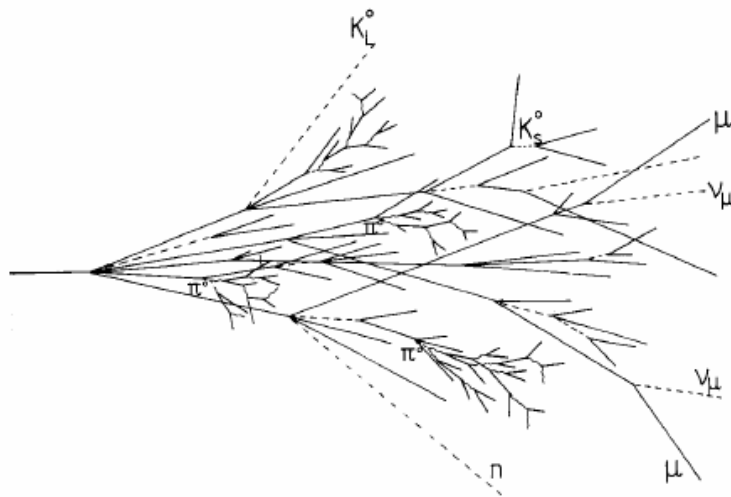
Constant term

Noise term

Inhomogenities  
Bad cell inter-calibration  
Non-linearities

Electronic noise  
radioactivity  
pile up

# Calorimétrie hadronique



(Gruppen)

Création de gerbes similaires aux gerbes électromagnétiques, par interactions fortes inélastiques

Hadronic

+

electromagnetic component



charged pions, protons, kaons ....  
 Breaking up of nuclei  
 (binding energy),  
 neutrons, neutrinos, soft  $\gamma$ 's  
 muons ....  $\rightarrow$  invisible energy

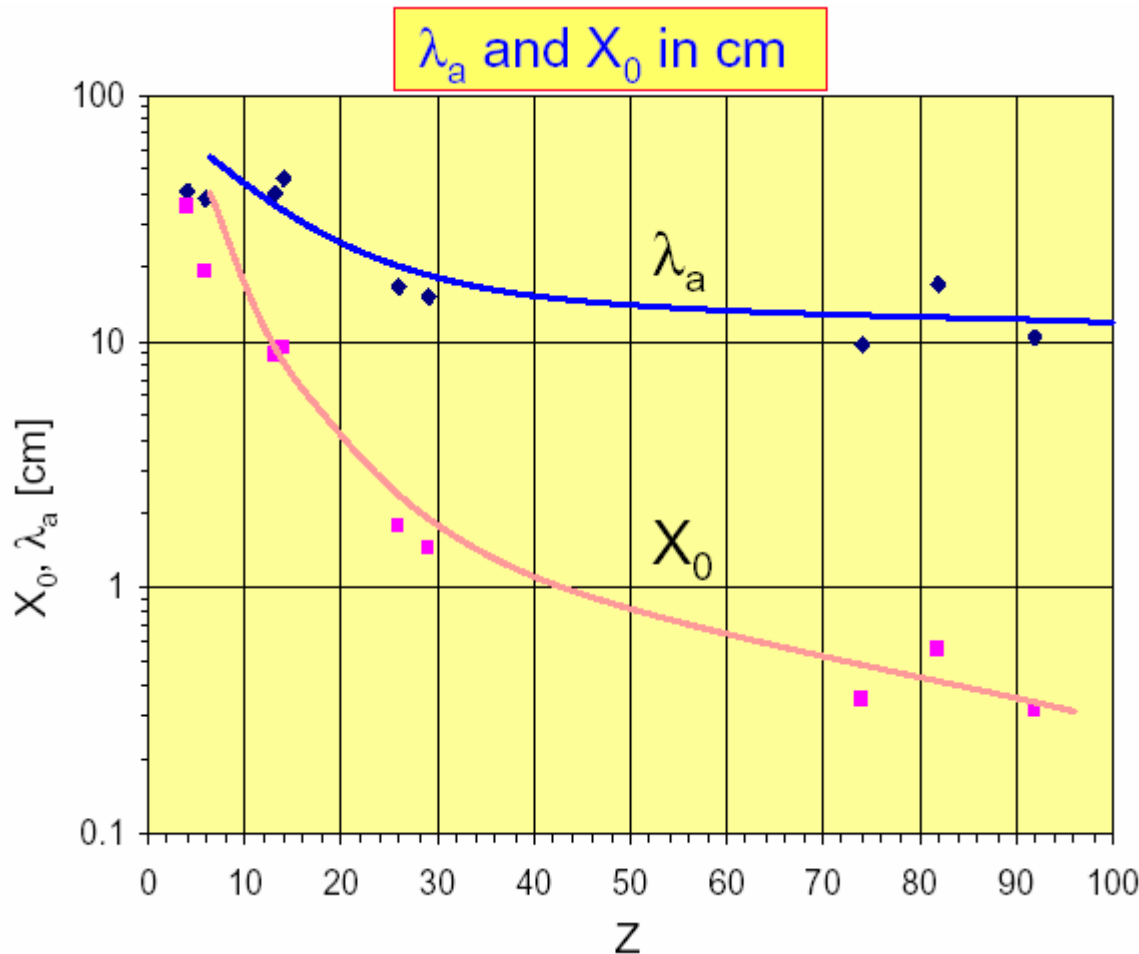


neutral pions  $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$   
 electromagnetic cascade  
 $n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$   
 example 100 GeV:  $n(\pi^0) \approx 18$

Fluctuations importantes, la résolution est moins bonne que pour des gerbes électromagnétiques

# Description des gerbes hadroniques

De façon analogue à  $X_0$ , on définit une longueur d'interaction hadronique  $\lambda_I$



$$\lambda \approx 35 \text{ g cm}^{-2} A^{1/3}$$

# Types de calorimètres

- Homogènes : le détecteur et l'absorbeur sont identiques
  - Bonne résolution en énergie
  - Segmentation en profondeur difficile (identification des particules)
  - Résolution spatiale limitée
  - Utilisés pour la calorimétrie électromagnétique
- A échantillonnage
  - Absorbeur et détecteur séparés (sandwich)
  - Résolution en énergie moins bonne que les homogènes
  - Meilleure résolution spatiale
  - Utilisés en calorimétrie électromagnétique et hadronique

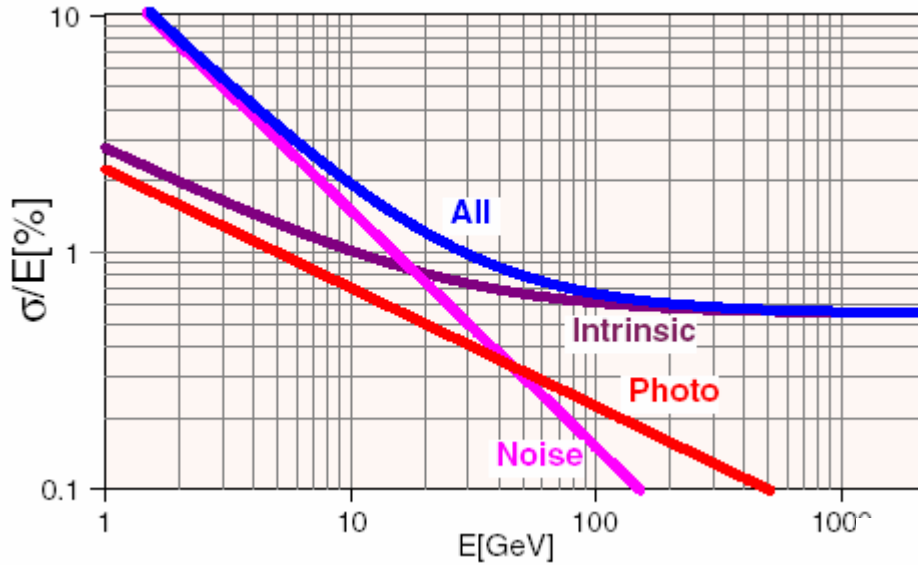
# Calorimètres homogènes

- Scintillateurs ou radiateurs Cherenkov lus par des détecteurs optiques

Material	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	X <sub>0</sub> [cm]	n	Light yield [p.e./GeV] (rel. p.e.)	λ <sub>cut</sub> [nm]	Rad. Dam. [Gy]	Comments
SF-5 Lead glass	4.08	2.54	1.67	600 (1.5×10 <sup>-4</sup> )	350	10 <sup>2</sup>	
SF-6 Lead glass	5.20	1.69	1.81	900 (2.3×10 <sup>-4</sup> )	350	10 <sup>2</sup>	
PbF <sub>2</sub>	7.66	0.95	1.82	2000 (5×10 <sup>-4</sup> )		10 <sup>3</sup>	Not available in quantity

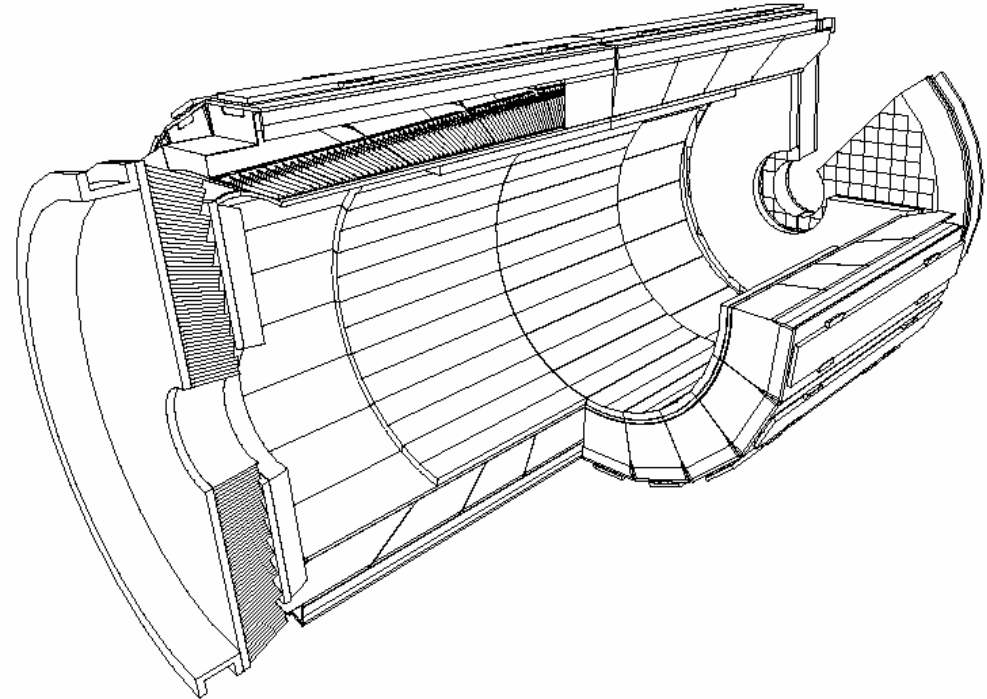
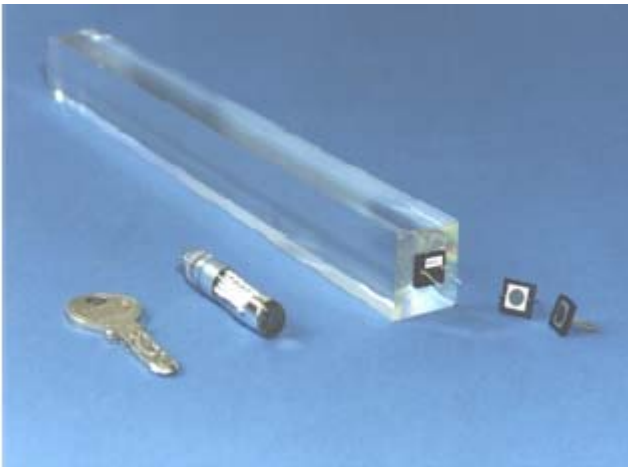
Relative light yield: rel. to NaI(Tl) readout with PM (bialkali PC)

# Exemples



ECAL de CMS  
(diam. interne  $\approx 1300$ ,  
externe  $\approx 1715$ )

>80000 cristaux de  $PbW_4$ ,  
Lus par des photodétecteurs (APD, VPT)

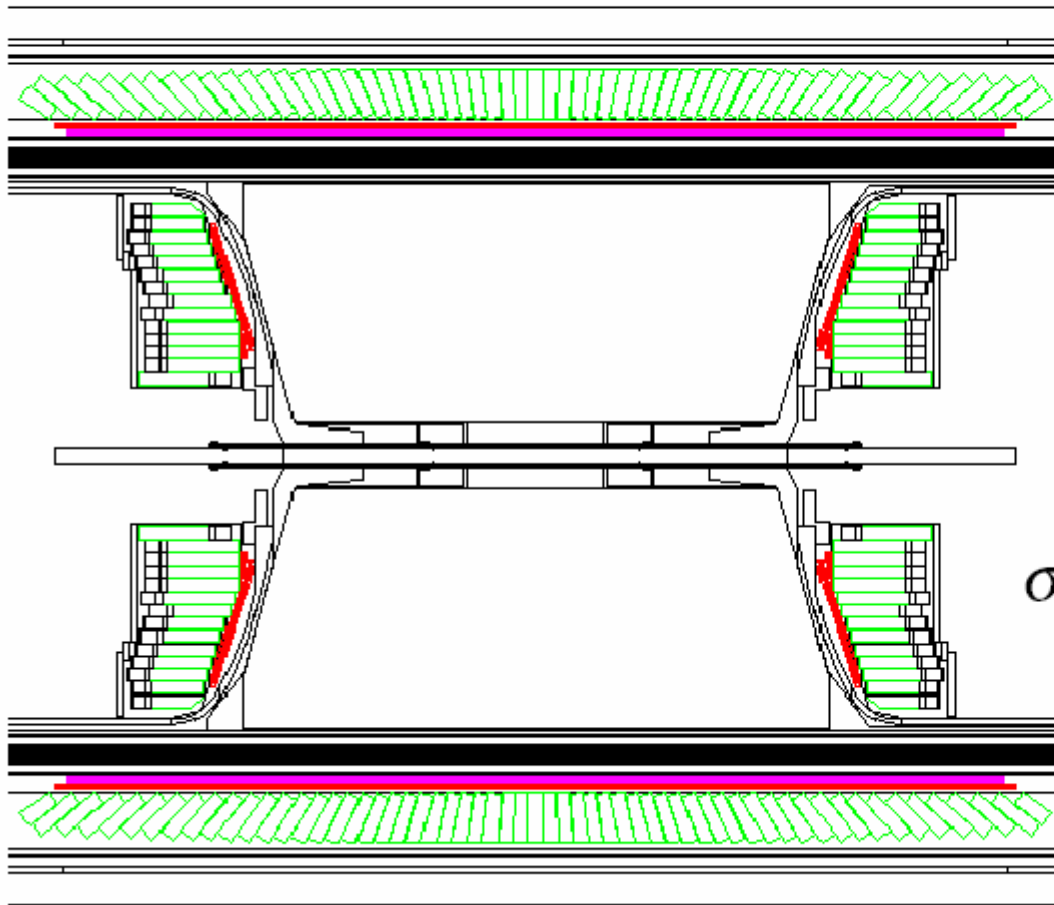




# Examples

## OPAL Barrel + end-cap: lead glass + pre-sampler

(OPAL collab. NIM A 305 (1991) 275)

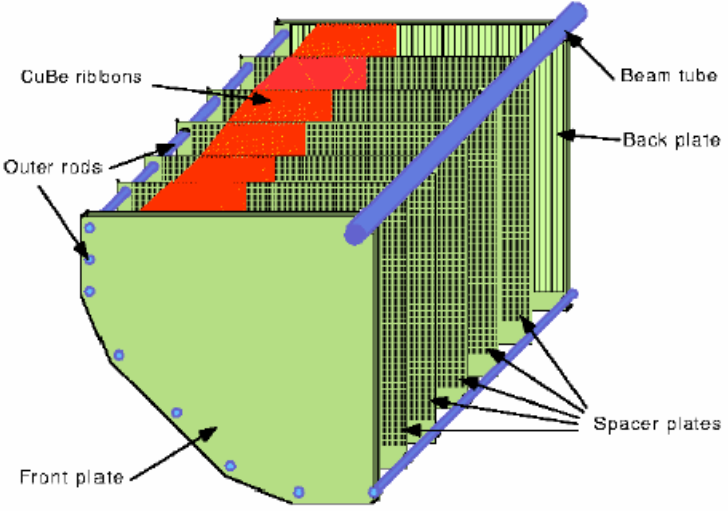


≈ 10500 blocks (10 x 10 x 37 cm<sup>3</sup>, 24.6 X<sub>0</sub>),  
PM (barrel) or PT  
(end-cap) readout.

$$\sigma(E)/E = 0.06/\sqrt{E} \oplus 0.002$$

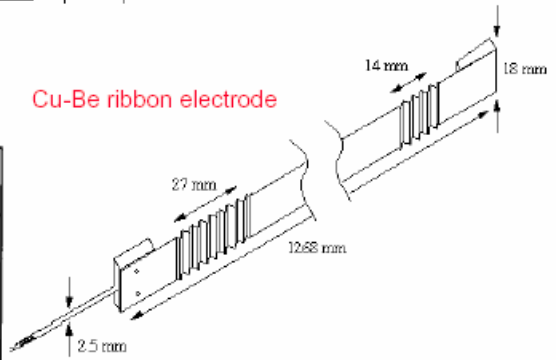
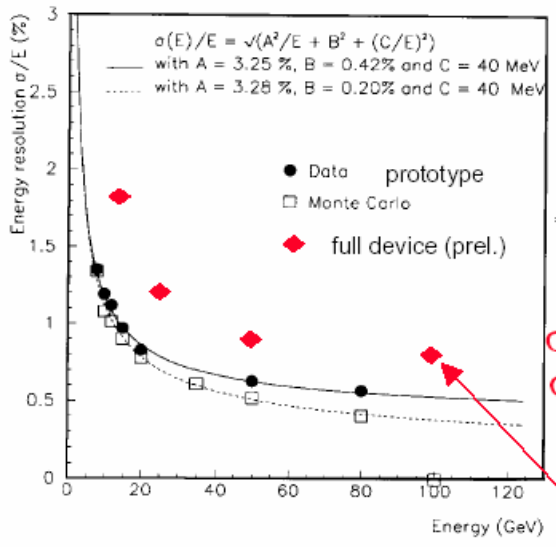
Spatial resolution  
(intrinsic) ≈ 11 mm  
at 6 GeV

# Exemples



Calorimètre électromagnétique de NA48 (LKr) à 120 K

Pas d'absorbeur

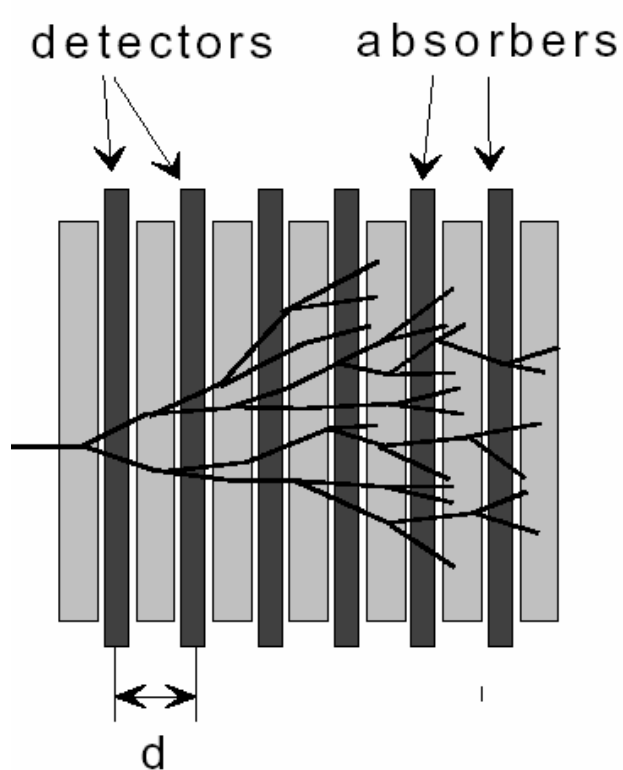


$\sigma_{x,y} \leq 1$  mm  
 $\sigma_t \approx 230$  ps

97 run: reduced performance due to problems with blocking capacitors → lower driftfield: 1.5 kV/cm rather than 5 kV/cm

(V. Marzulli, NIM A 384 (1996) 237, M. Martini et al., VII International Conference on Calorimetry, Tuscon, 1997)

# Calorimètres à échantillonnage



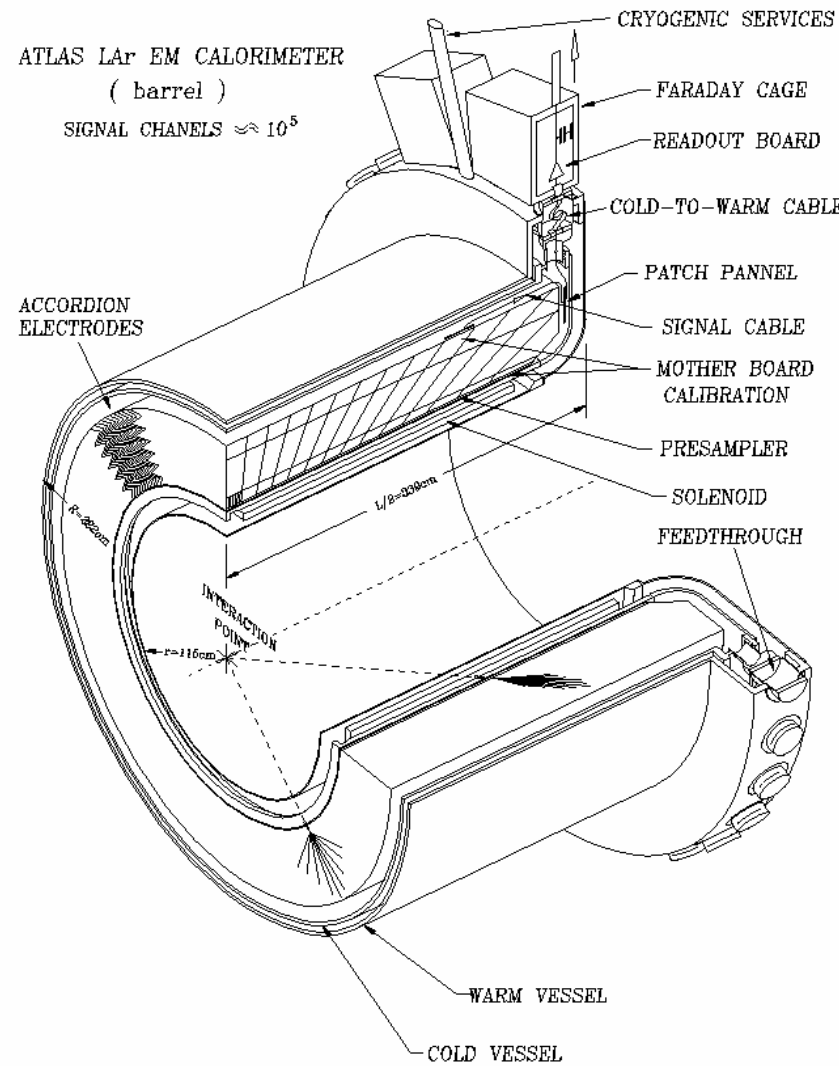
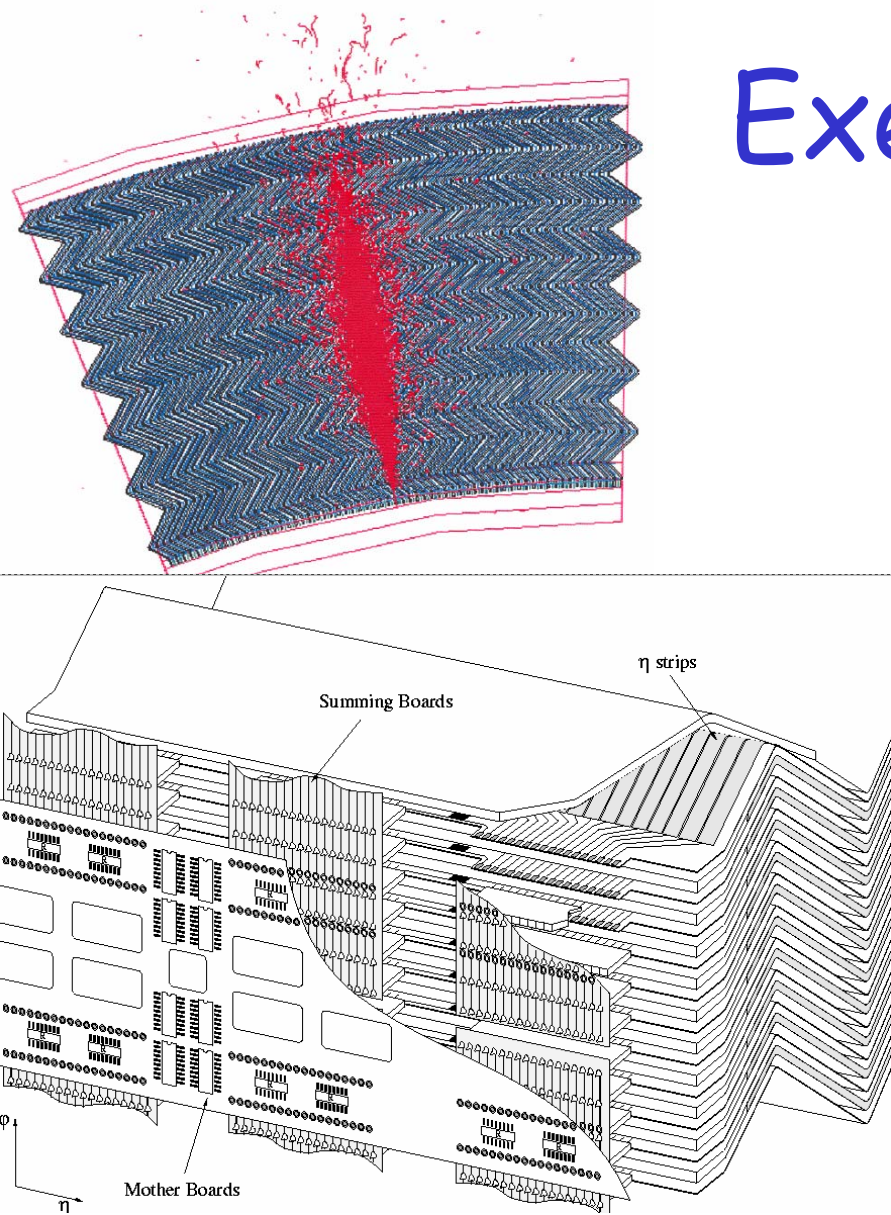
$$N = \frac{T_{\text{det}}}{d} \quad \text{Detectable track segments}$$

$$= F(\xi) \frac{E}{E_c} X_0 \frac{1}{d}$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sqrt{N}}{N} \propto \sqrt{\frac{1}{E}} \cdot \sqrt{\frac{d}{X_0}}$$

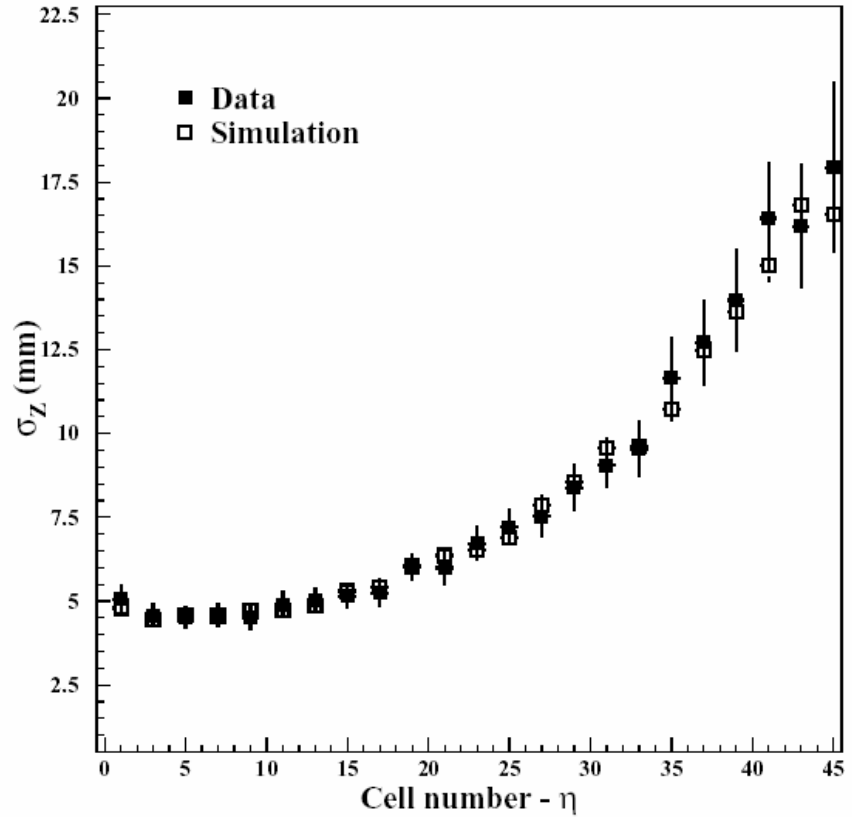
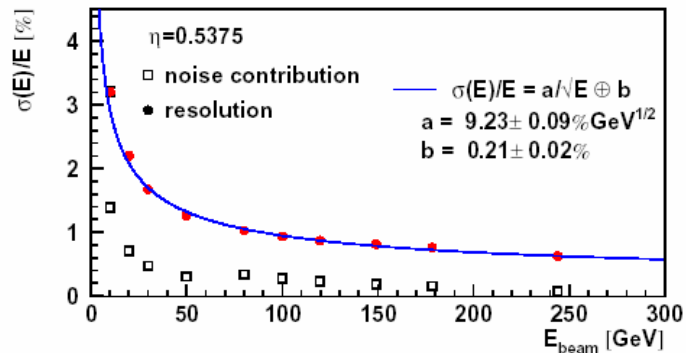
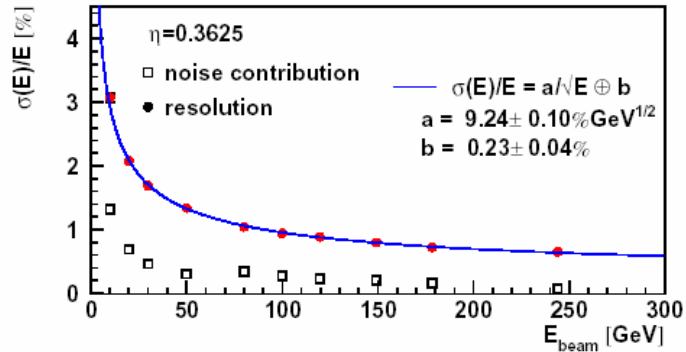
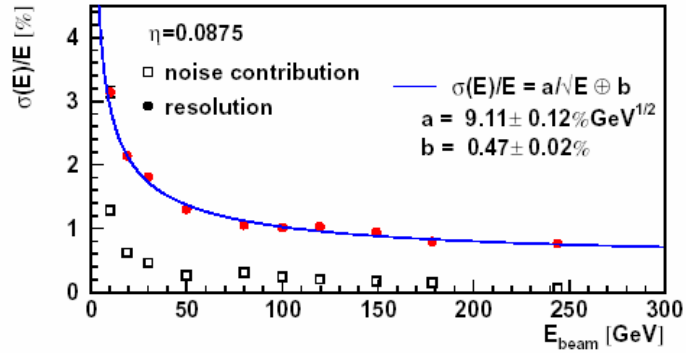
Détecteur : ce que l'on veut ... Scintillateurs, chambres, gaz nobles liquides, silicium.

# Exemple



Calorimètre EM d'ATLAS  
Pb/LAr, géométrie accordéon

# Performances



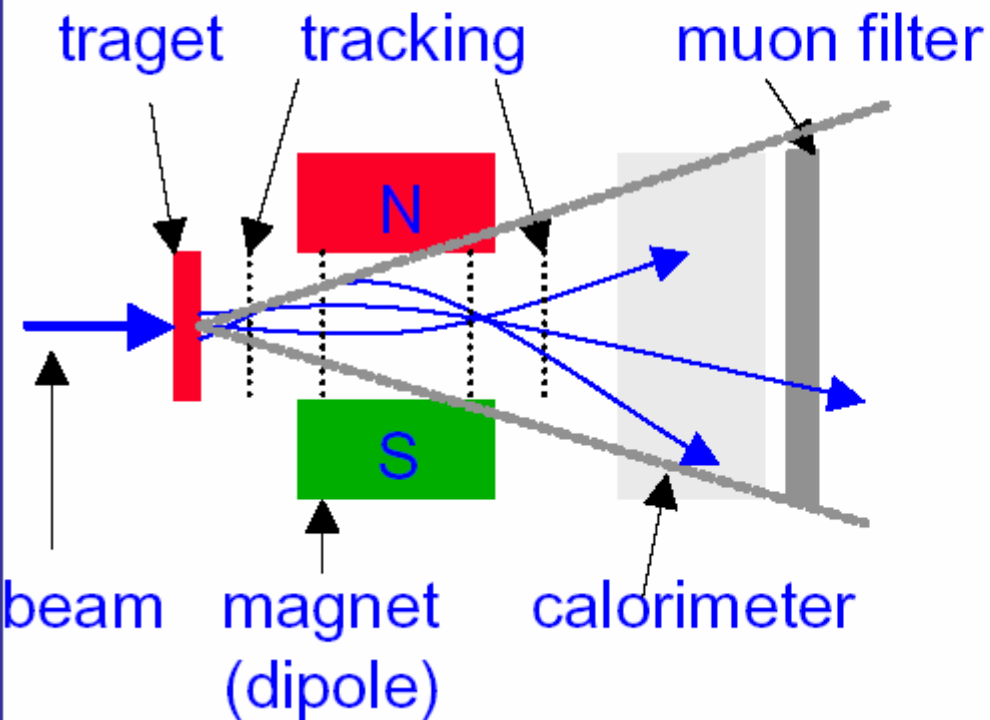
# Détecteurs complets

- Combinaison de plusieurs techniques de détection, car multiples informations désirées
- Impulsion :
  - détecteurs gazeux
  - Silicium
  - Fibres scintillantes
- Energie :
  - Calorimètre électromagnétique
  - Calorimètre hadronique
- Muons :
  - Détecteurs gazeux
- Nature des particules (identification)
  - Détecteurs gazeux
  - Cherenkov
  - Temps de vol

# Structure générale

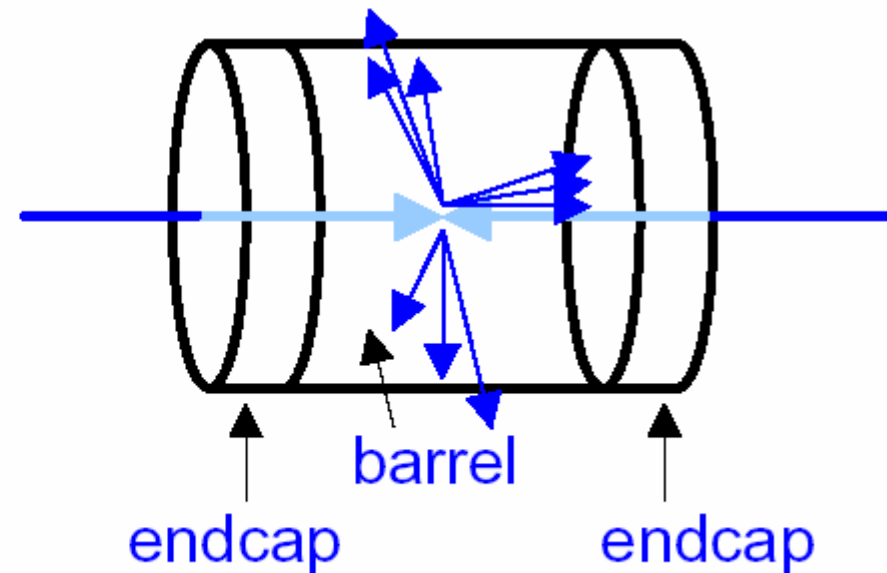
Fix target geometry

“Magnet spectrometer”

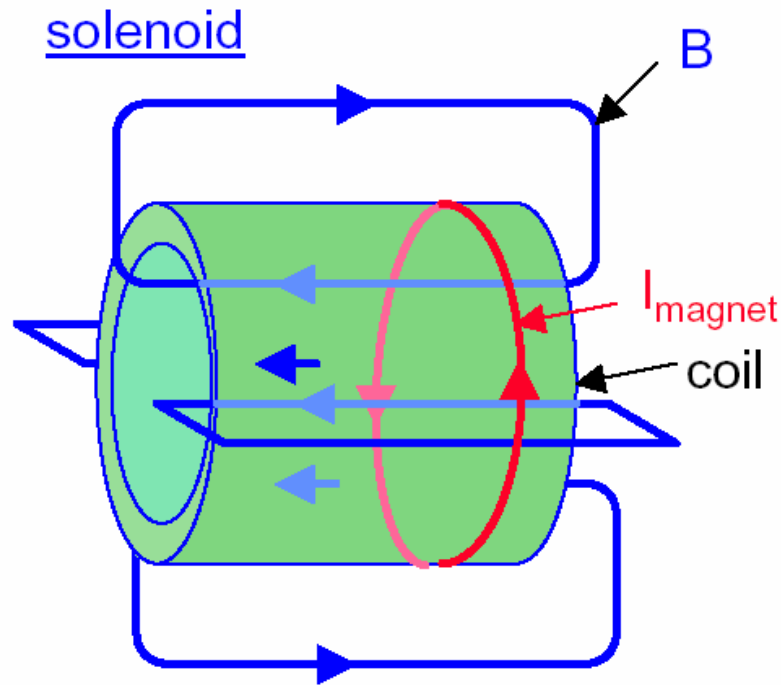


Collider Geometry

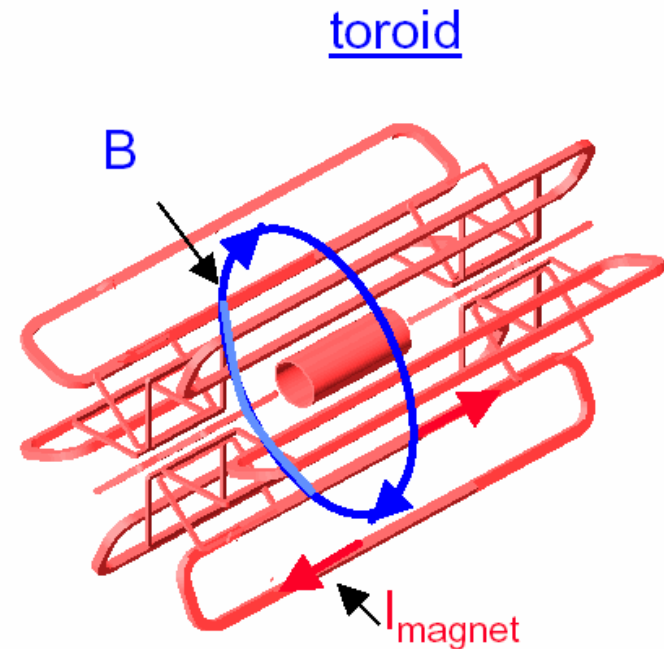
“ $4\pi$  Multi purpose detector”



# Champs magnétiques possibles



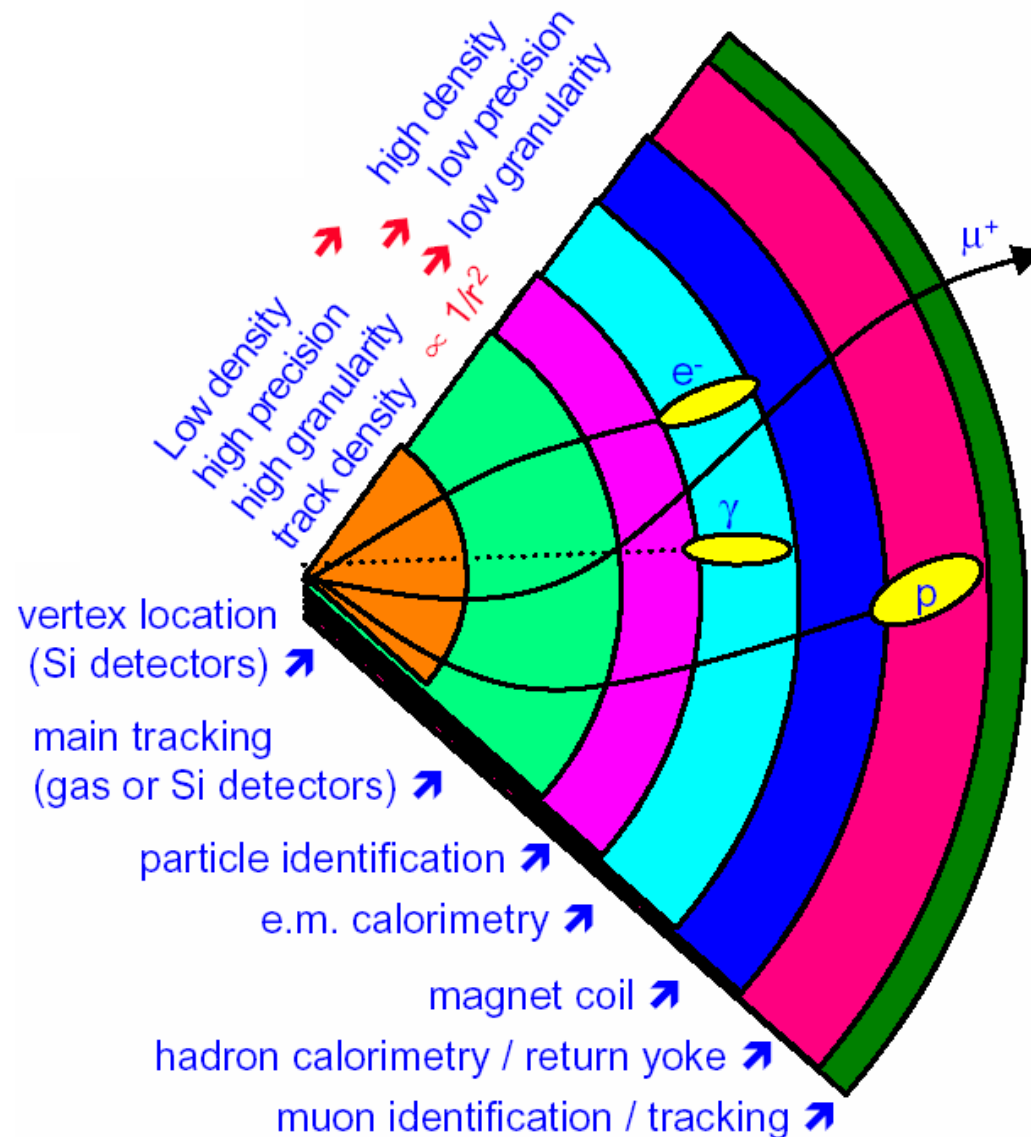
- + Large homogenous field inside coil
- weak opposite field in return yoke
- Size limited (cost)
- rel. high material budget

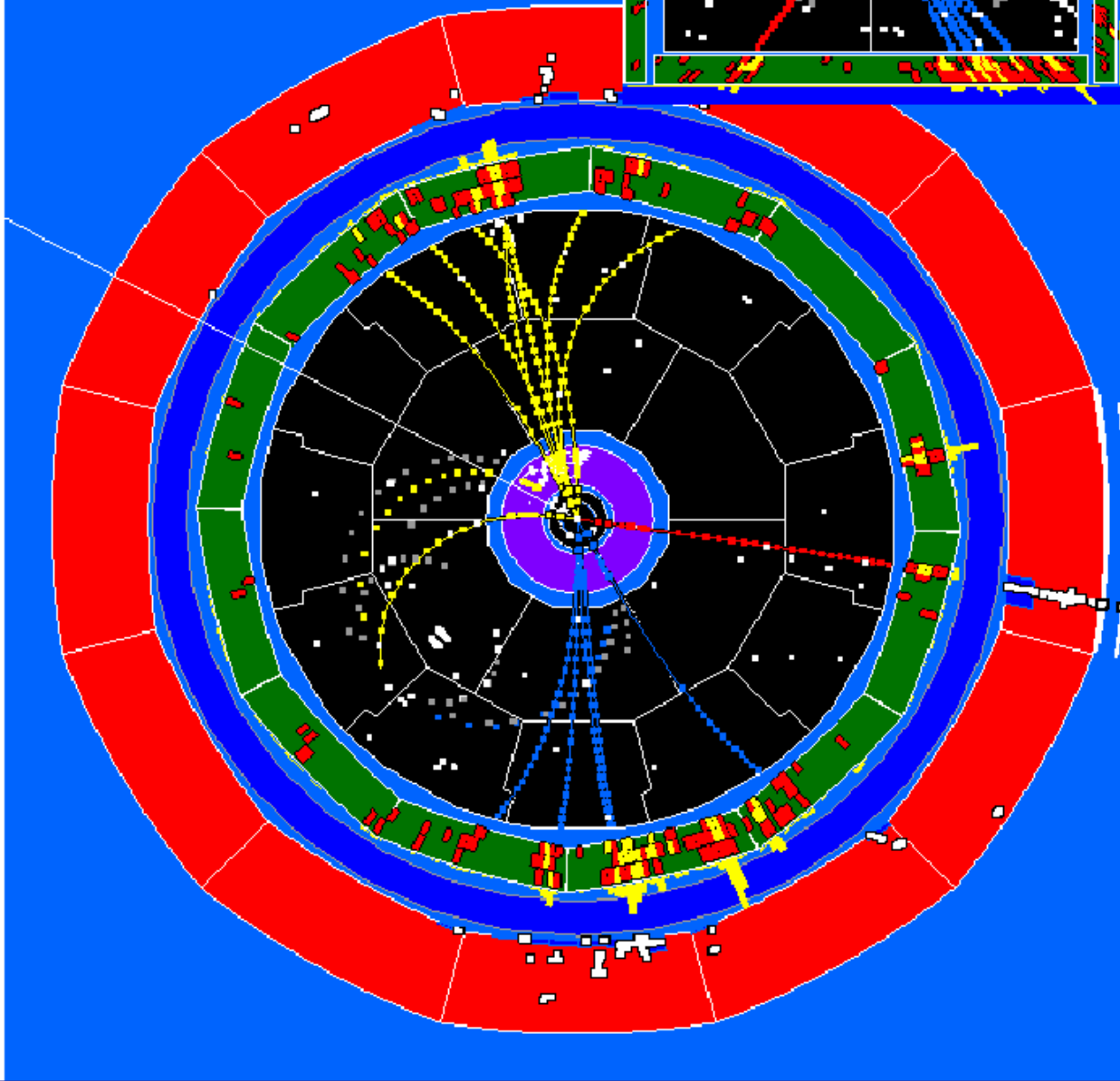
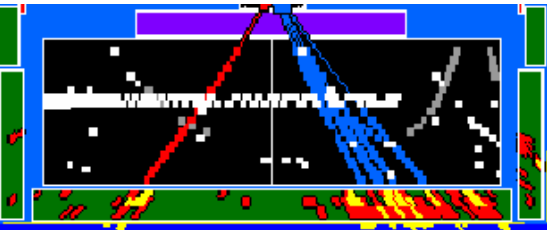


- + Rel. large fields over large volume
- + Rel. low material budget
- non-uniform field
- complex structure

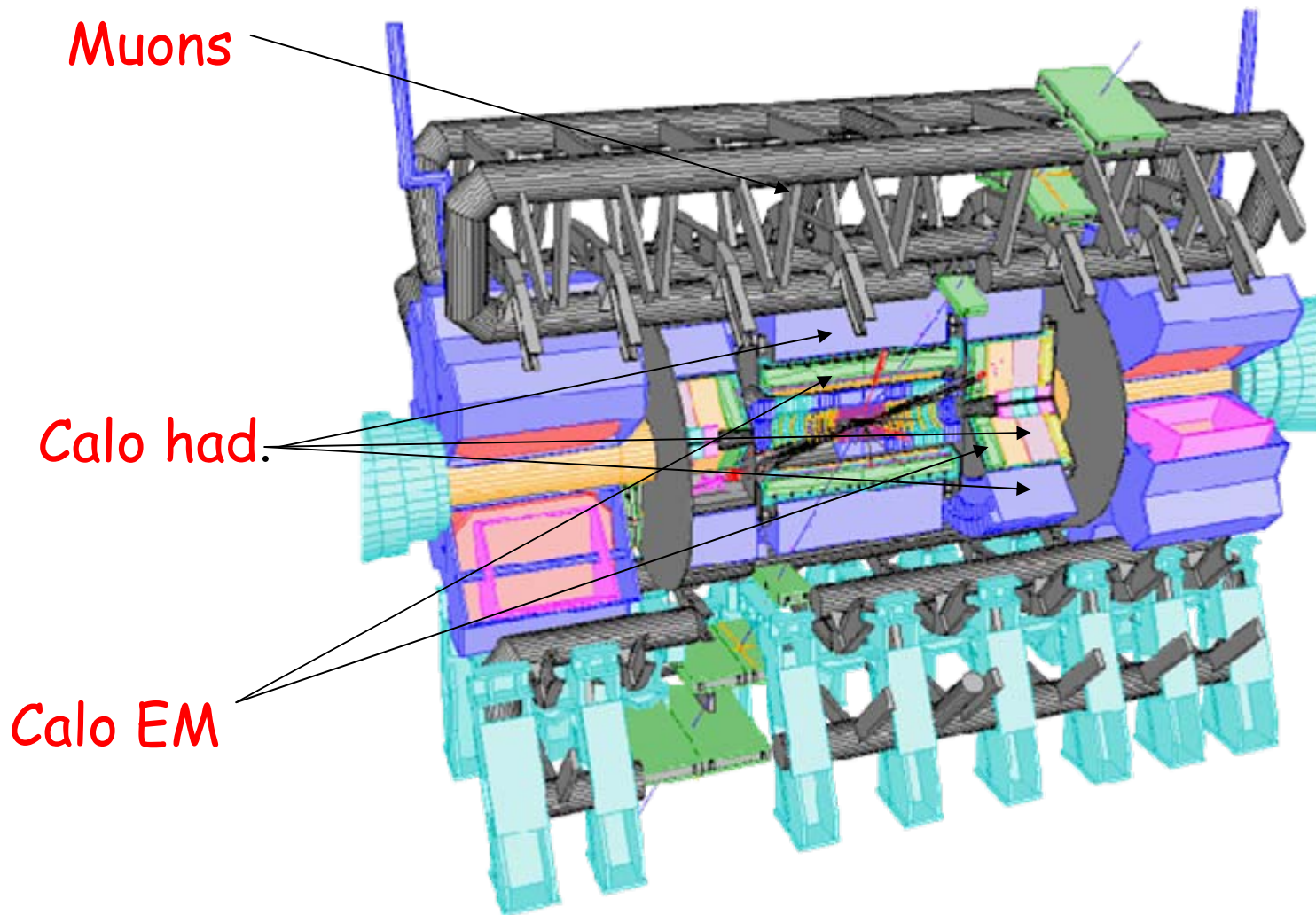


# Structure globale d'un détecteur

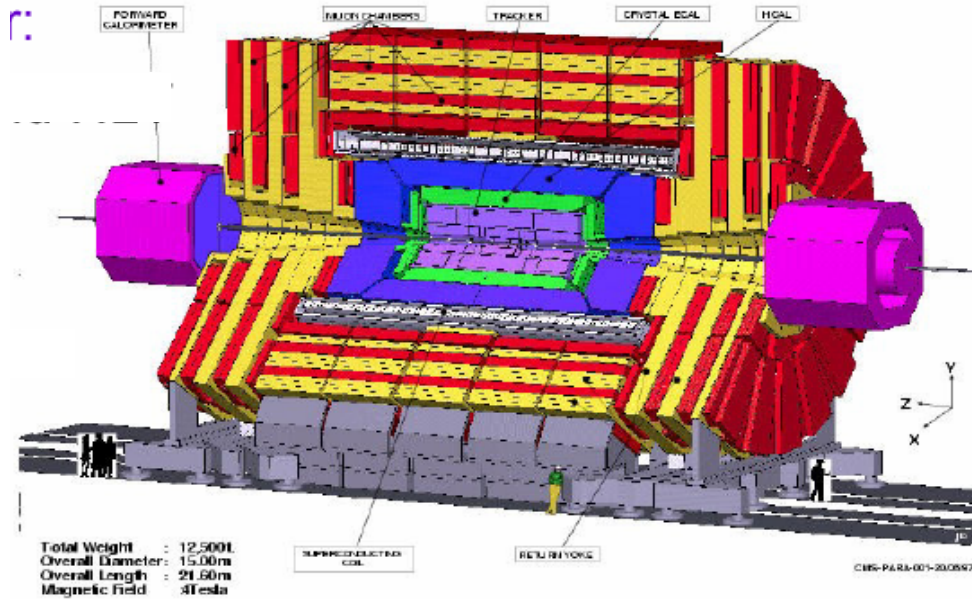
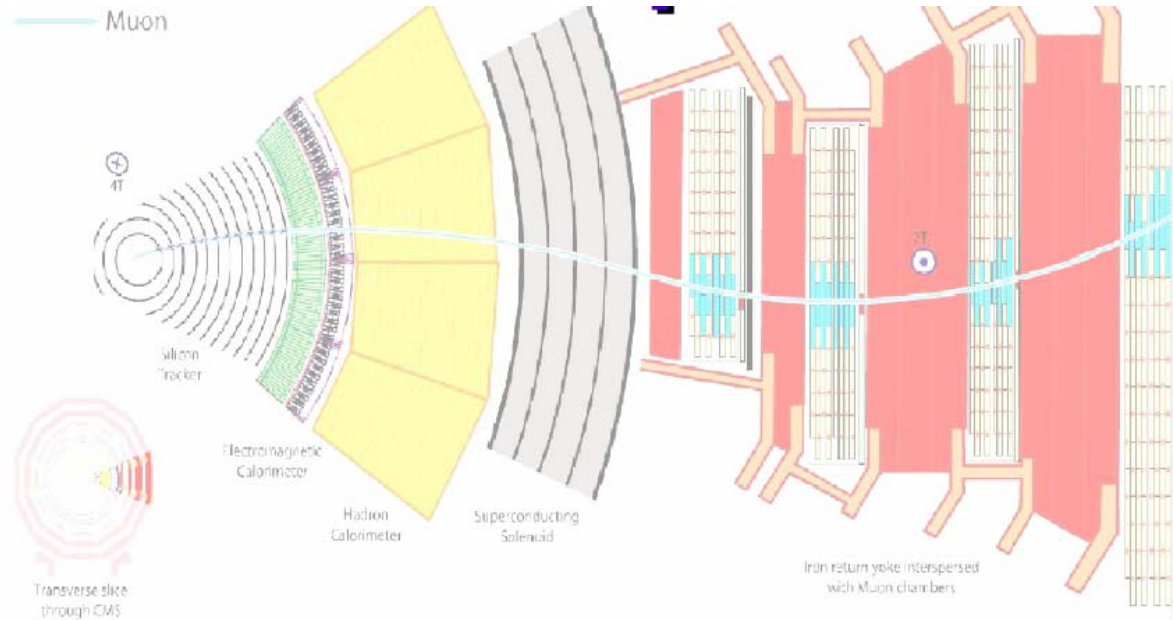




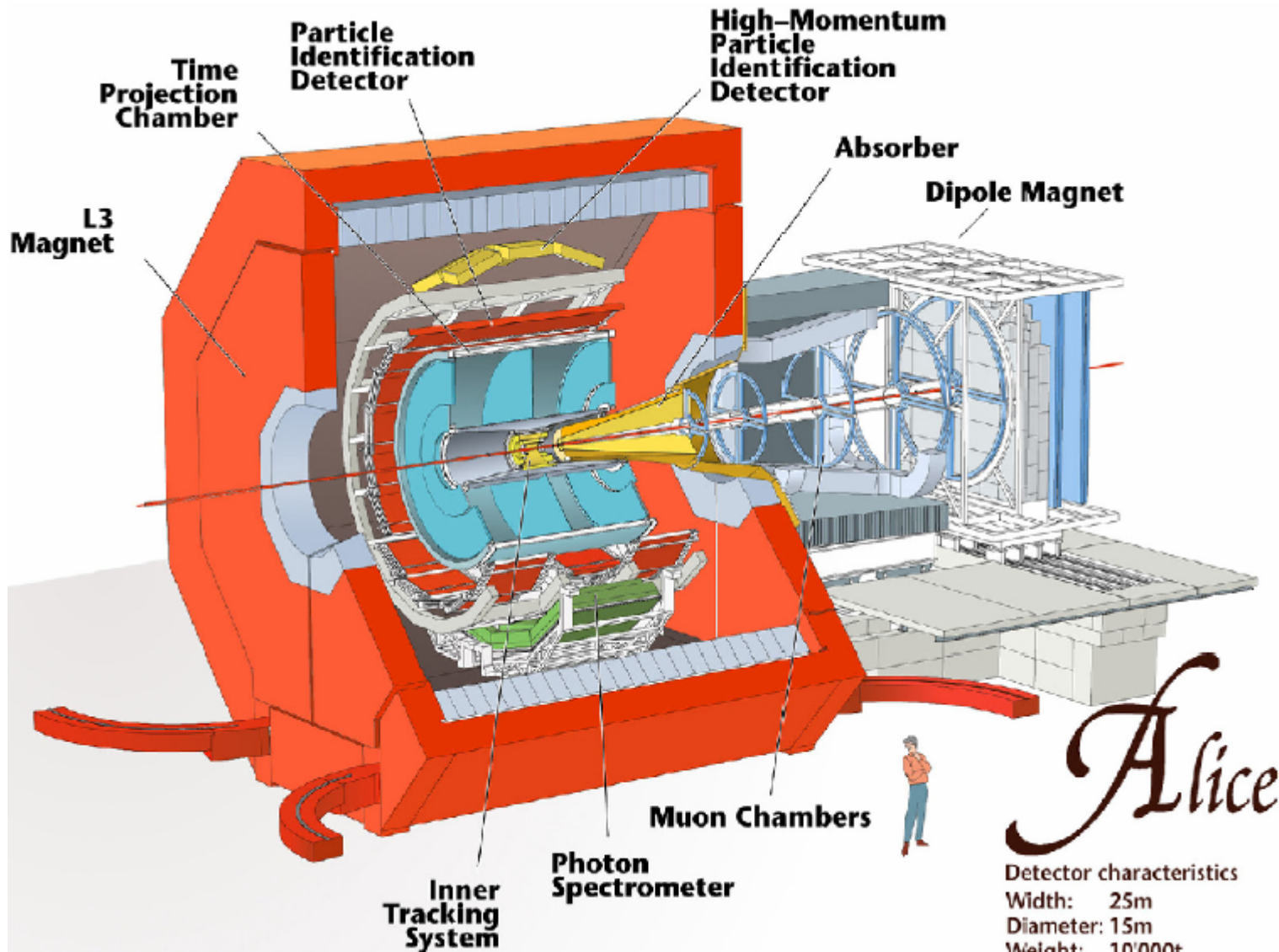
# ATLAS



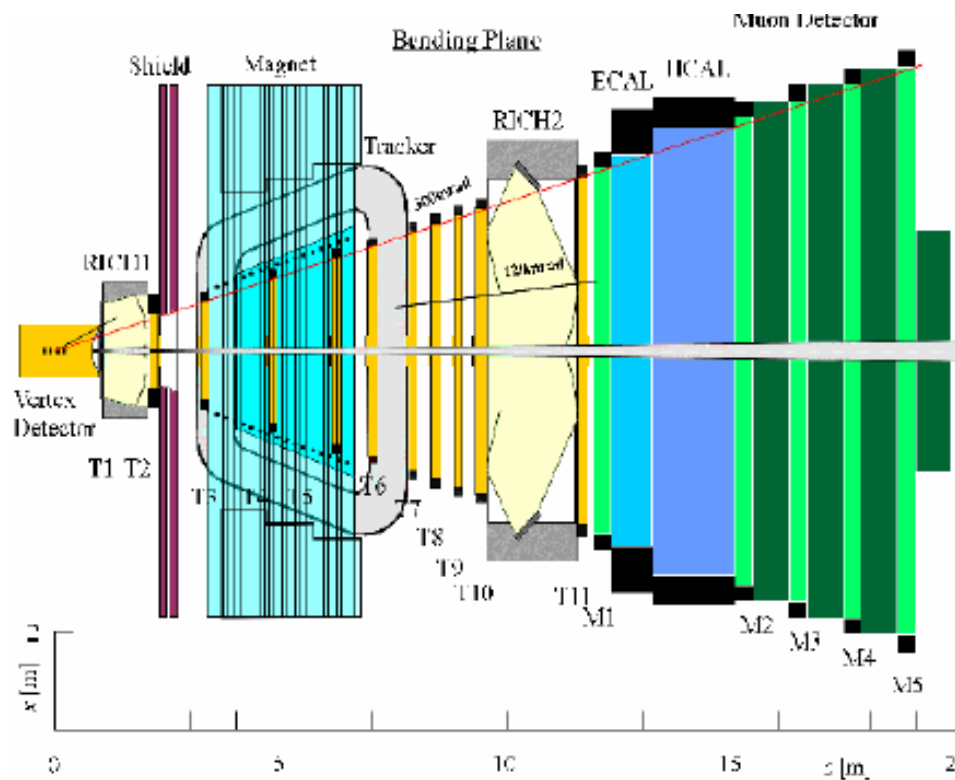
# CMS



# ALICE

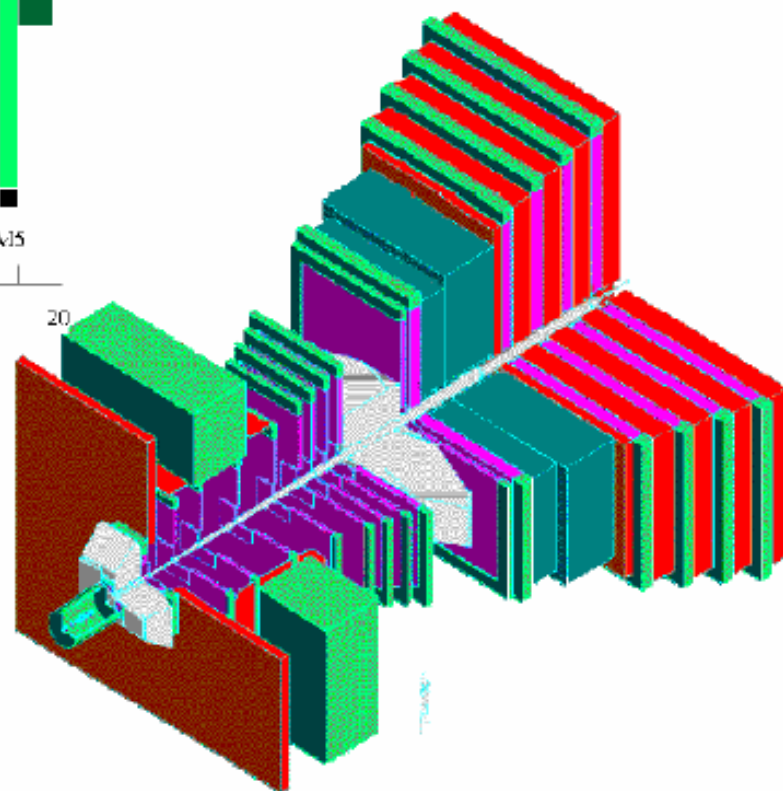


# LHCb



## Detector Characteristics

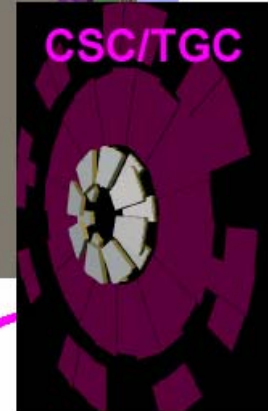
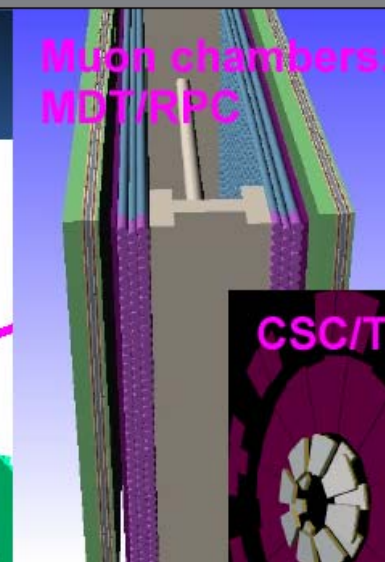
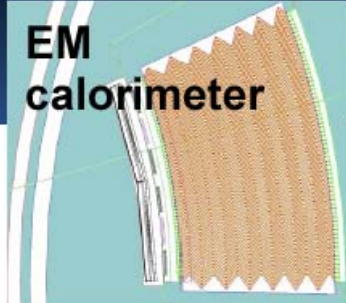
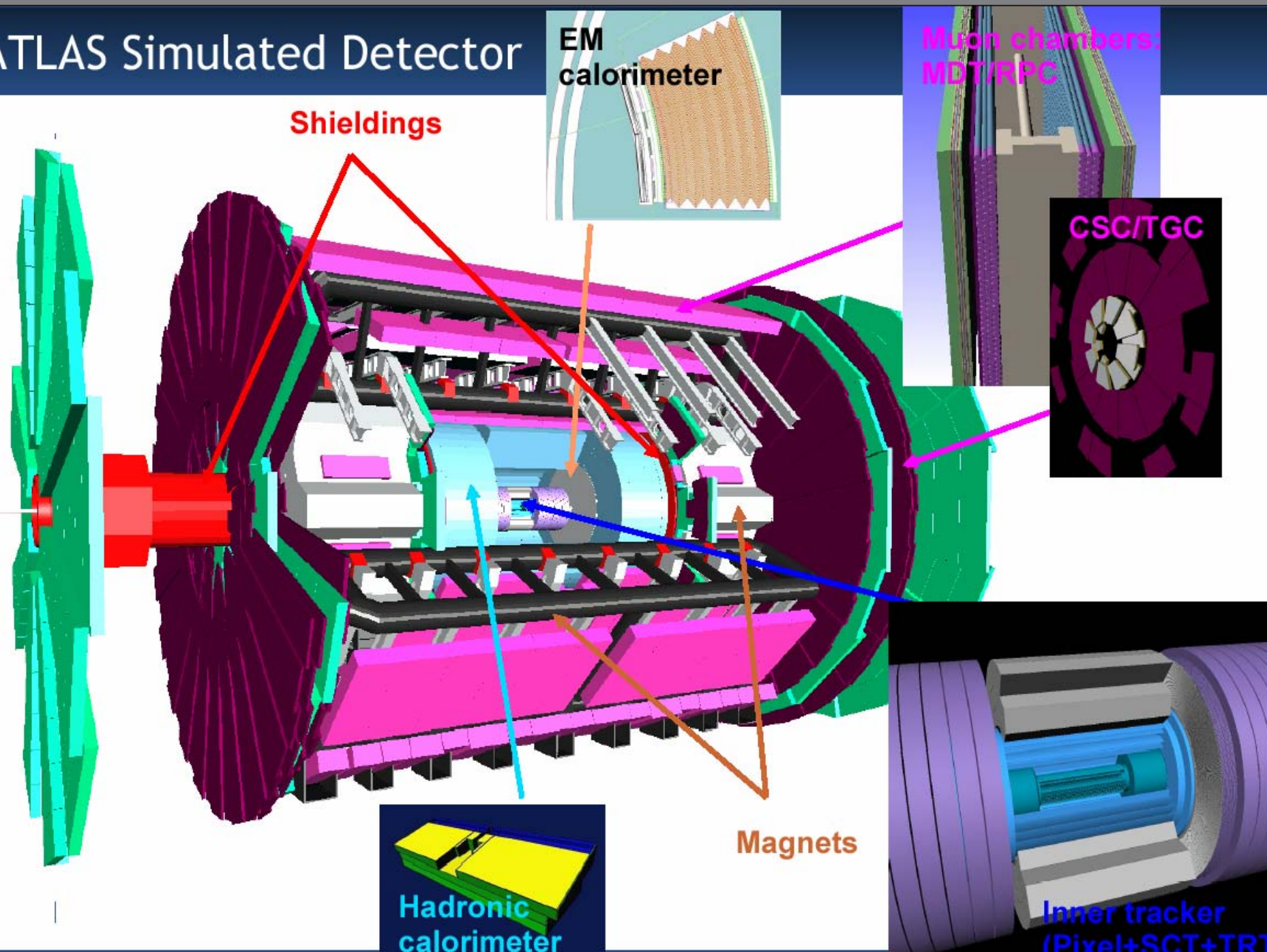
- Length: 20 m
- Width: 12 m
- Height: 12 m
- Weight: 2'000 tons



# Simulation

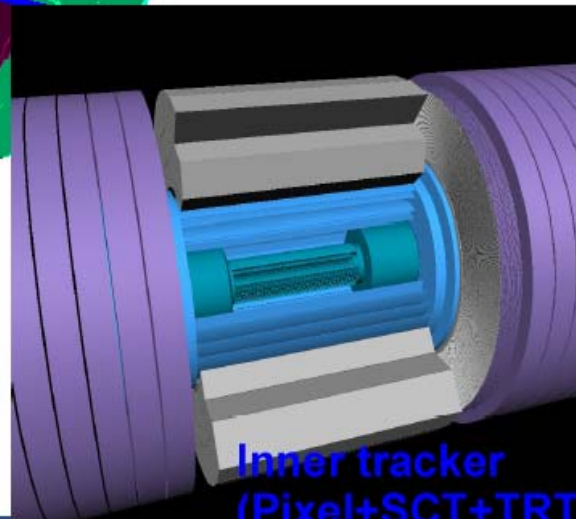
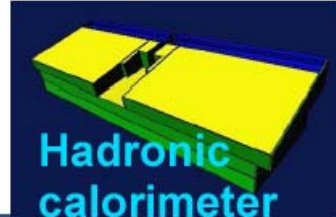
- Il est très rare que l'on puisse concevoir et optimiser un détecteur de façon purement analytique
  - Géométries trop complexes
  - Prise en compte indispensable de façon détaillée des processus physiques individuels

# ATLAS Simulated Detector



Shieldings

Magnets

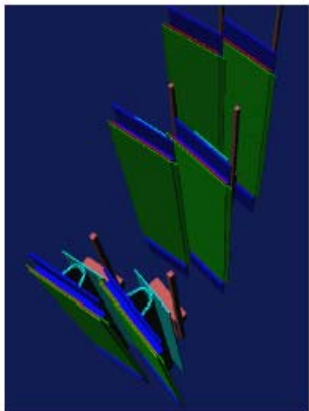




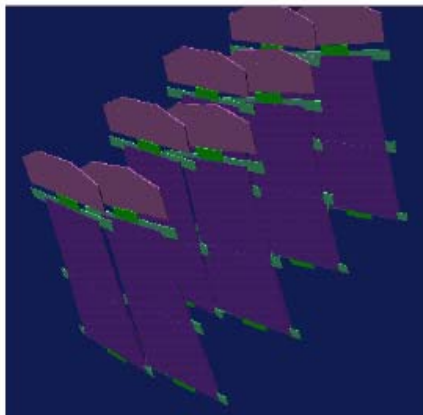
# ATLAS detector description

10th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors  
(IPRD06) 1 - 5 October 2006 - Siena, Italy

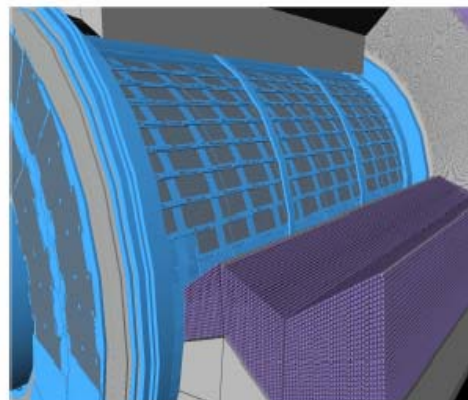
■ PIXEL : ~ 6000 volumes



■ SCT: ~40500 volumes

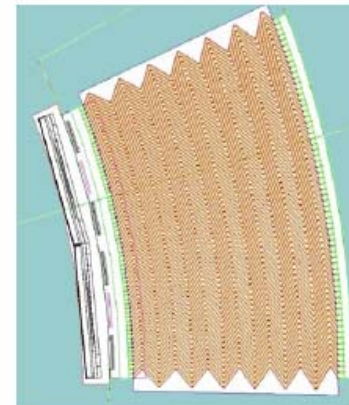


■ TRT: ~300000 volumes



■ (mostly parameterized)

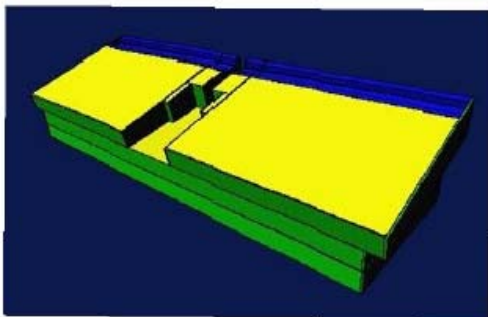
■ LAr Calo: ~142500 volumes



■ (partly parameterized)

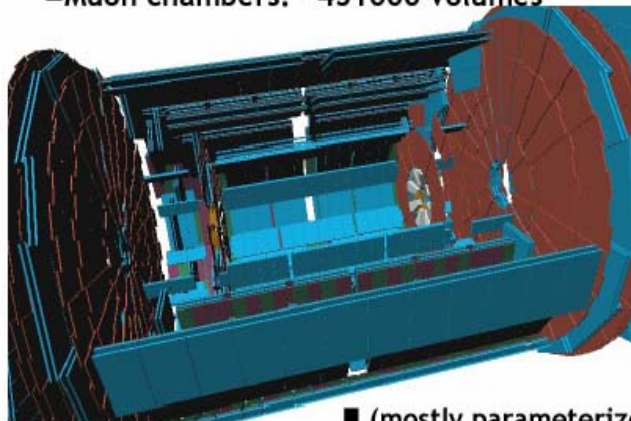
■ Gallery of sub-detector geometries as seeing by G4ATLAS

■ Tile Calorimeter: ~8500 volumes



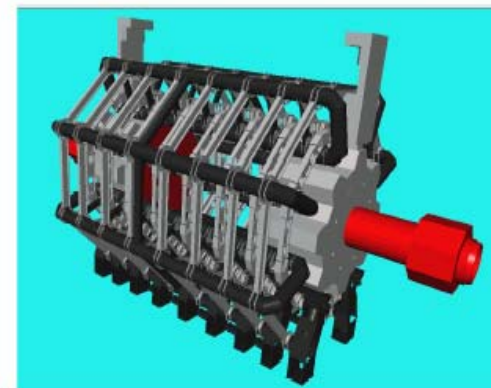
■ (mostly parameterized)

■ Muon chambers: ~451000 volumes



■ (mostly parameterized)

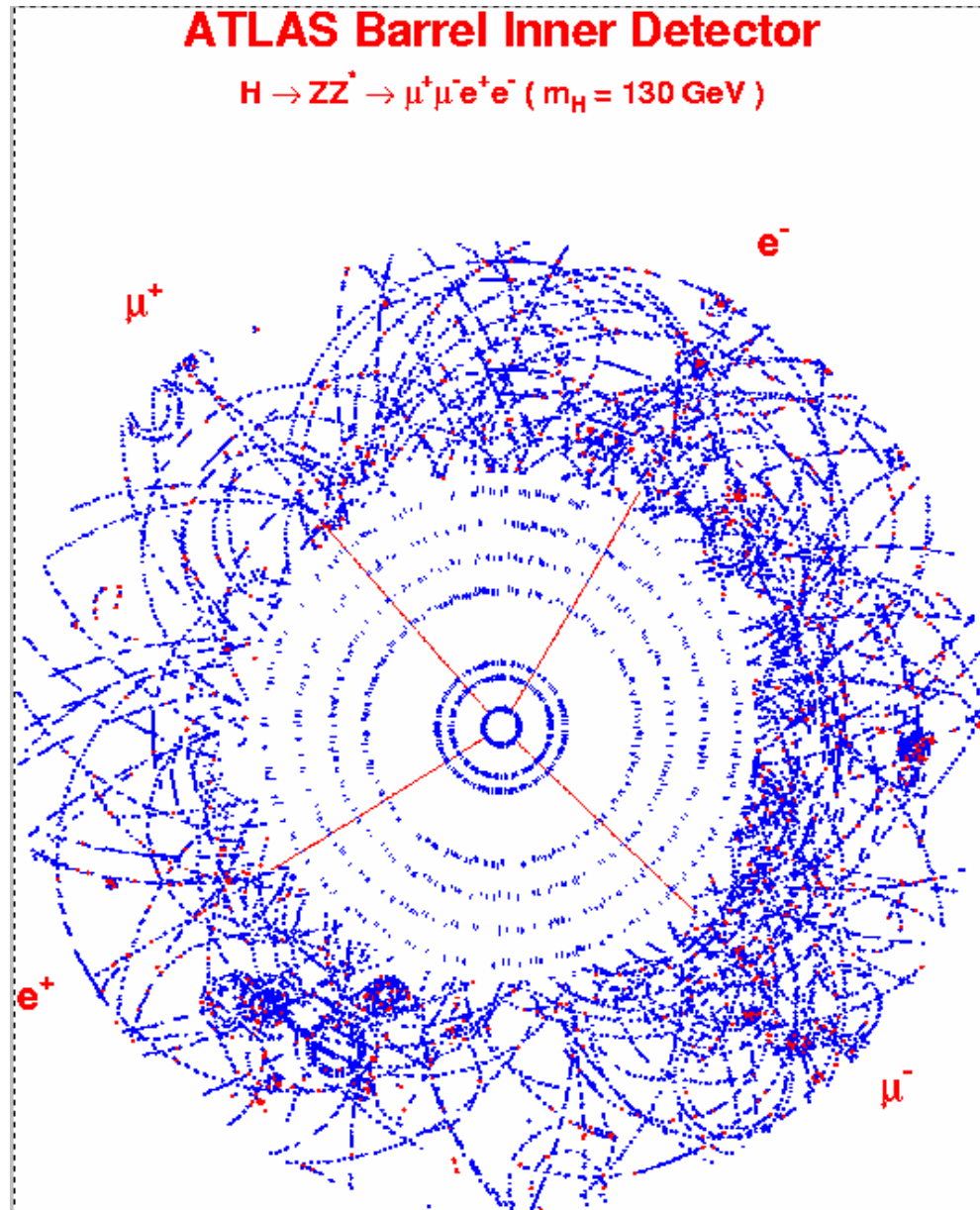
■ Toroids ~ 1000 volumes



# Un outil de conception : GEANT

- Définition de la géométrie
- Définition des matériaux (et de leurs propriétés physiques)
- Suivi des trajectoires de particules, description de leur interaction avec la matière (Bethe-Bloch et au-delà)
- Mesure et analyse de l'énergie déposée

# Simulation des interactions



# Quelques volumes élémentaires

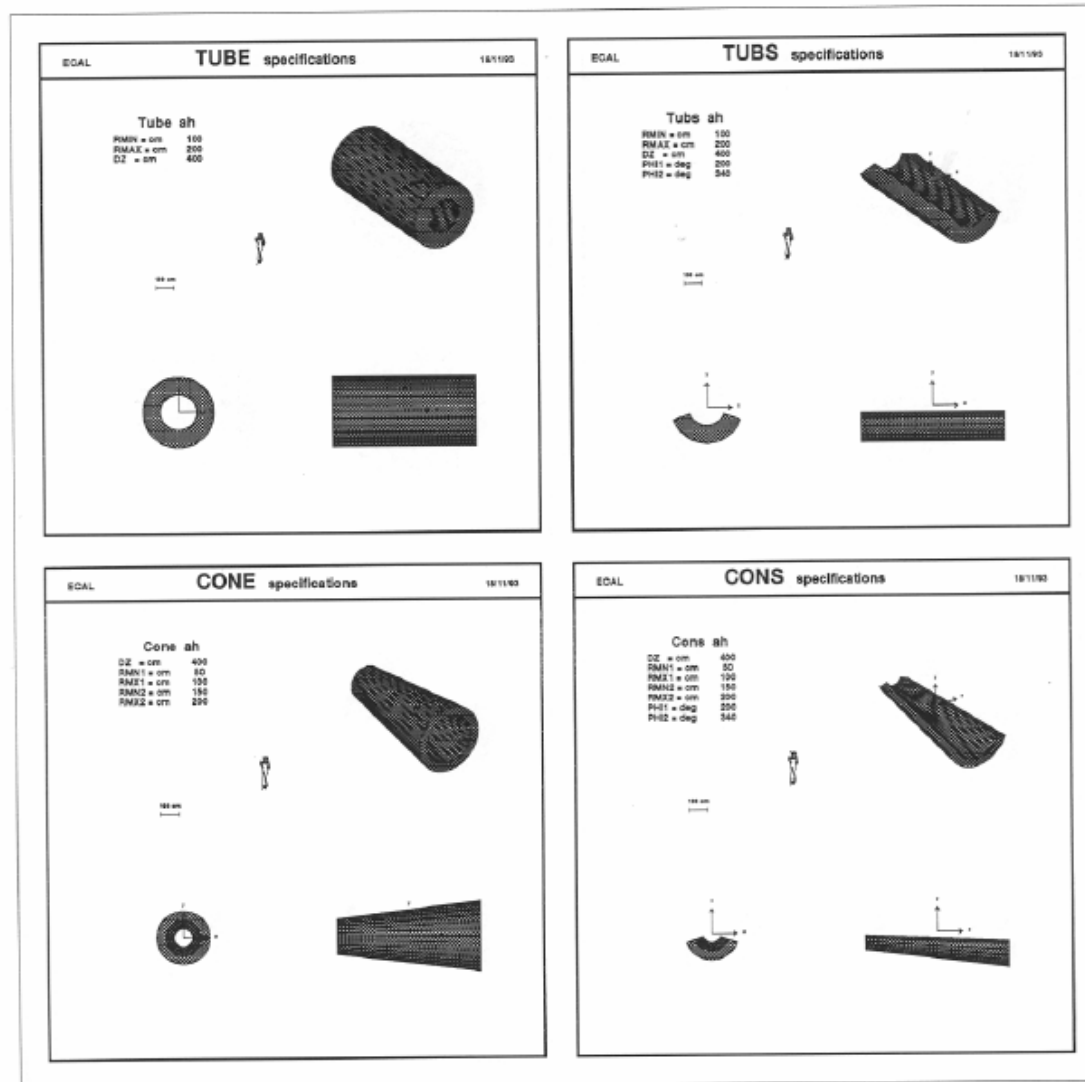


Figure 22: shapes TUBE, TUBS, CONE, CONS

# Quelques processus physiques

Below are listed the data record keywords, the flag names and values, and the resulting action:

Keyword	Related process
DCAJ	Decay in flight. The decaying particles stops. The variable IDCAY controls this process. IDCAY =0 No decay in flight. =1 <b>(D)</b> Decay in flight with generation of secondaries. =2 Decay in flight without generation of secondaries.
MULS	Multiple scattering. The variable IMULS controls this process. IMULS =0 No multiple scattering. =1 <b>(D)</b> Multiple scattering according to Molière theory. =2 Same as 1. Kept for backward compatibility. =3 Pure Gaussian scattering according to the Rossi formula.
PFIS	Nuclear fission induced by a photon. The photon stops. The variable IPFIS controls this process. IPFIS =0 <b>(D)</b> No photo-fission. =1 Photo-fission with generation of secondaries. =2 Photo-fission without generation of secondaries.
MUNU	Muon-nucleus interactions. The muon is not stopped. The variable IMUNU controls this process. IMUNU =0 No muon-nucleus interactions. =1 <b>(D)</b> Muon-nucleus interactions with generation of secondaries. =2 Muon-nucleus interactions without generation of secondaries.
LOSS	Continuous energy loss. The variable ILOSS controls this process. ILOSS =0 No continuous energy loss, IDRAY is forced to 0. =1 Continuous energy loss with generation of $\delta$ -rays above DCUTE (common /GCUTS/) and restricted Landau fluctuations below DCUTE. =2 <b>(D)</b> Continuous energy loss without generation of $\delta$ -rays and full Landau-Vavilov-Gauss fluctuations. In this case the variable IDRAY is forced to 0 to avoid double counting of fluctuations. =3 Same as 1, kept for backward compatibility. =4 Energy loss without fluctuation. The value obtained from the tables is used directly.
PHOT	Photoelectric effect. The interacting photon is stopped. The variable IPHOT controls this process. IPHOT =0 No photo-electric effect. =1 <b>(D)</b> Photo-electric effect with generation of the electron. =2 Photo-electric effect without generation of the electron.
COMP	Compton scattering. The variable ICOMP controls this process. ICOMP =0 No Compton scattering. =1 <b>(D)</b> Compton scattering with generation of $e^-$

Diffusion multiple

Bethe-Bloch

Photoélectrique

Compton

# Bethe-Bloch vu par Geant

$$T_{max} = \frac{2m(\gamma^2 - 1)}{1 + 2\gamma\frac{m}{M} + (\frac{m}{M})^2} \quad (2)$$

The energy lost in ionising collisions producing  $\delta$ -rays below  $T_{cut}$  are included in the continuous energy loss. The mean value of the energy lost due to these *soft* collisions is:

$$E_{loss}(E, T_{cut}) = \int_0^{T_{cut}} T \frac{d\sigma(E, T)}{dT} dT \quad (3)$$

where  $m$  is the electron mass and  $M$  is the mass of the incident particle.

In this chapter, the method of calculation of the continuous energy loss and the total cross-section are explained. The generation of  $\delta$ -rays is explained in chapter [PHYS331].

## 2.1 Continuous energy loss

The integration of (3) leads to the Bethe-Block stopping power or to the restricted energy loss formula [55]:

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right) = \begin{cases} D \frac{Z Z_{inc}^2}{A \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - \frac{2C_e}{Z} \right] & \text{if } T_{cut} \geq T_{max} \\ D \frac{Z Z_{inc}^2}{A \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2 T_c}{I^2} \right) - \beta^2 \left( 1 + \frac{T_c}{T_{max}} \right) - \delta - \frac{2C_e}{Z} \right] & \text{if } T_{cut} < T_{max} \end{cases} \quad (4)$$

where,

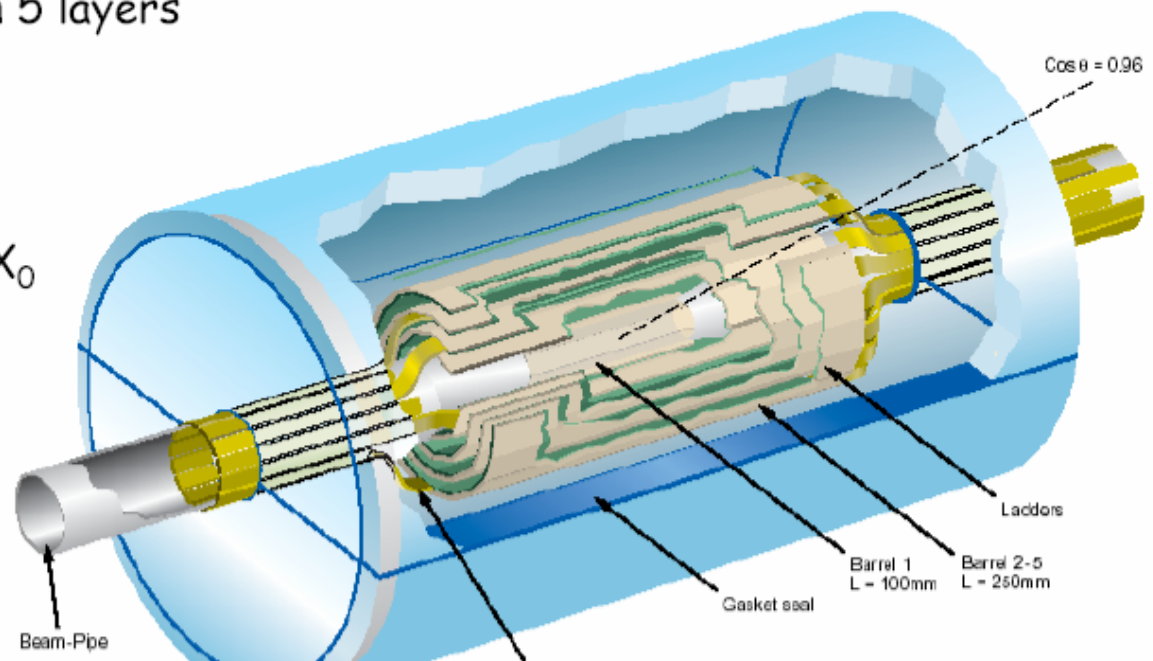
$D$	$2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.000153537 \text{ GeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$	$Z$	atomic number of medium
$A$	mass number	$\rho$	density of medium
$T_c$	$\min(T_{cut}, T_{max})$	$m_e$	electron mass

and  $I$  is the average ionisation potential of the atom in question. There exists a variety of phenomenological approximations for this. In former versions of GEANT the formula quoted by [82] was used ( $I = 16 Z^{0.9}$

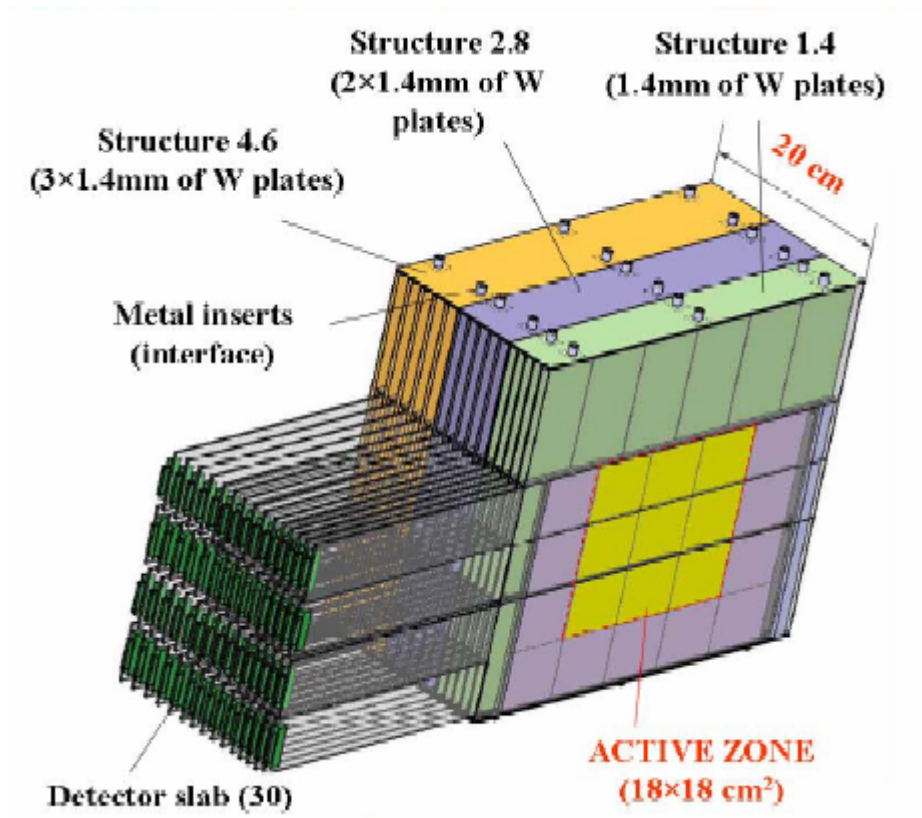
# Les détecteurs du futur

## ILC Vertex Detector

- Detector not yet determined; sensor technology not chosen yet
  - Many sensor options; CCDs, DEPFET, CMOS pixels, FP-CCD, etc...
  - Many new ideas being developed (see Ringberg Workshop)
  - It is too early to choose; no need to yet!
- Fast (column-parallel readout) CCDs
  - Sensor+layout concept actively being developed
  - $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  pixels in 5 layers
  - $\sim 10^9$  channels
  - Inner radius 1.5 cm
  - Readout time  $50\ \mu\text{s}$
  - Ladder thickness  $0.1\% X_0$



# Les détecteurs du futur



Module de calorimètre  
W/Si pour ILC



# SLHC

- naively extrapolating from an SCT to an SLHC layer assuming 5 times more channels, we get (one layer, barrel, normal impact):

Component	R.L. for SCT	Scaling factor*	R.L. for SLHC
<b>Cable</b>	<b>0.2 %</b>	<b>x 5</b>	<b>1 %</b>
Hybrid	0.3 %	<b>x 5</b>	1.5 %
Sensor	0.6 %	x 1	0.6 %
Cooling; CF cylinders; module baseboard; etc.	0.4; 0.3; 0.2 %	<b>x <math>\approx 3</math></b> ; x 1; x 1	1.7 %
<b>Total</b>	<b>2 %</b>		<b>5 %</b>
Silicon fraction	30 %		12 %

\*crude estimate; no innovation

**too big**  
↔  
**innovate!**

**Material budget** will explode at SLHC without innovations in powering, packaging, and cooling

# Aspects pratiques

Ne jamais perdre de vue que la conception  
d'un détecteur est aussi (et avant tout) un  
problème d'ingénieur

# En pratique

- Penser à la matière morte : câbles, tuyauteries diverses (refroidissement, gaz, cryogénie), structures de support.
- S'il faut mettre de la matière morte, la choisir du plus bas  $Z$  possible.
- Combien peut-elle représenter, est-ce tolérable pour la physique ?



# En conclusion

- Faire preuve de bon sens
- Savoir résister à l'envie (et à la pression) de réduire les marges de sécurité
- Eviter les concepts inutilement compliqués
- Ne pas réinventer la roue, mais voir d'abord ce qui a été fait ailleurs

# Liste des acronymes

- Formule de Bethe-Bloch : donne la perte d' énergie moyenne d'une particule chargée dans la matière
- Formule de Landau : donne la distribution de la perte d'énergie d'une particule dans la matière.
- ALEPH, DELPHI, OPAL, L3 : Détecteurs installés de 1989 à 2000 au LEP (CERN)
- ALICE, ATLAS, CMS, LHCb : Détecteurs installés à partir de 2007 au LHC (CERN)
- MWPC : Multi Wire Proportional Chamber, chambre proportionnelle multi fils.
- Quencher : corps chimique évitant l'apparition d'avalanches secondaires
- TGC : Thin Gap Chamber, chambre à gap étroit.
- RPC : Resistive Plate Chamber, chambre à plaques résistives.
- MSGC : Micro Strip Gas Chamber, détecteur gazeux à microstrips.
- GEM : Gaseous Electron Multiplier, multiplicateur d'électrons à gaz.

DC : Drift Chamber, Chambre à dérive

DT : Drift Tube, Tube à dérive.

TPC : Time Projection Chamber, chambre à projection temporelle

PM, PMT : PhotoMultiplier Tube, photomultiplicateur

Dynode : Electrode de photomultiplicateur

APD : Avalanche Photo-Diode : Photodiode à avalanche

HPD : Hybrid Photo-Detector

XO : longueur caractéristique du développement des gerbes électromagnétiques

$\lambda$  : longueur caractéristique du développement des gerbes hadroniques

GEANT : code de simulation de l'interaction des particules avec les détecteurs.

# Quelques exemples anciens

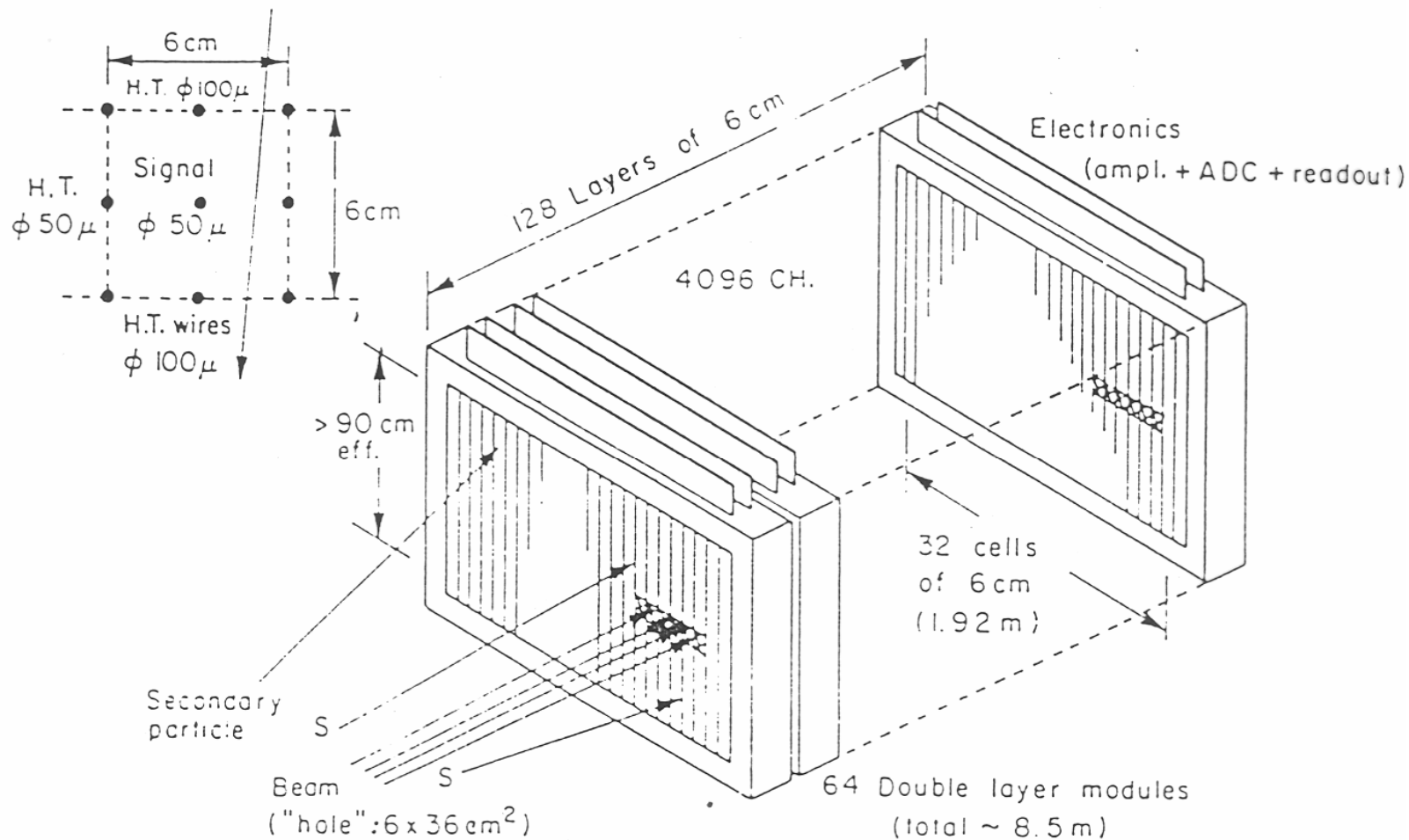
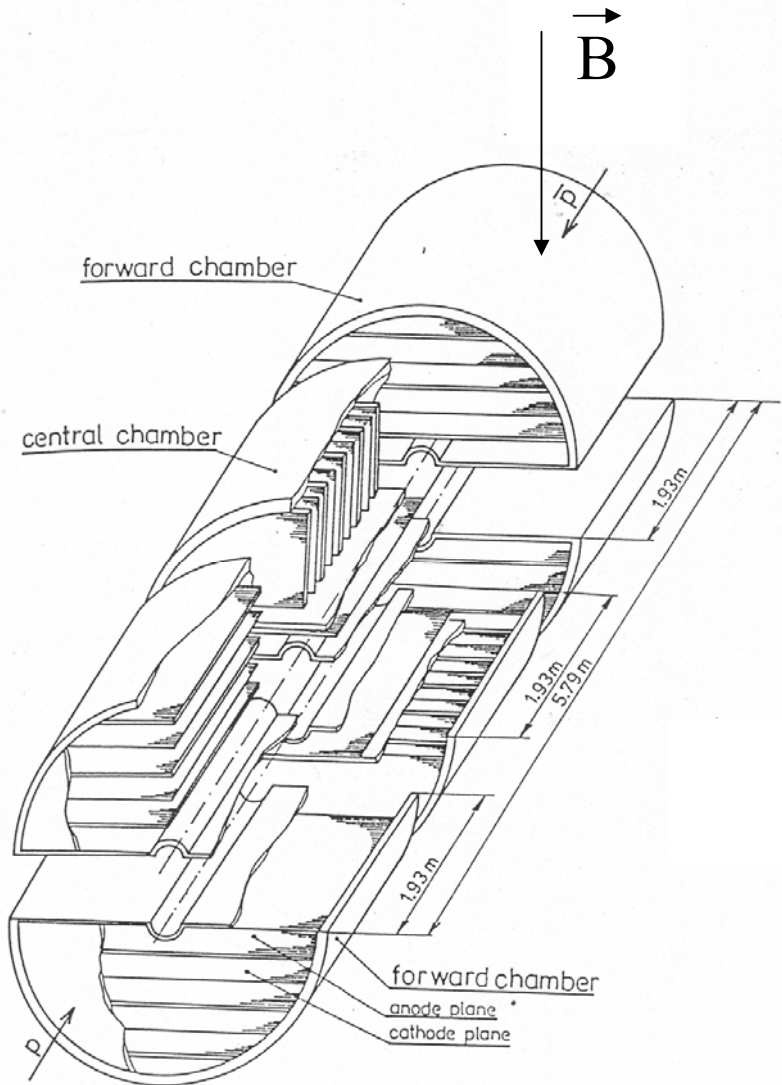


Fig. 3.2. Structure of the EPI multilayer proportional chamber (Baruzzi et al. 1983)

Détecteur associé à BEBC

# Quelques exemples anciens

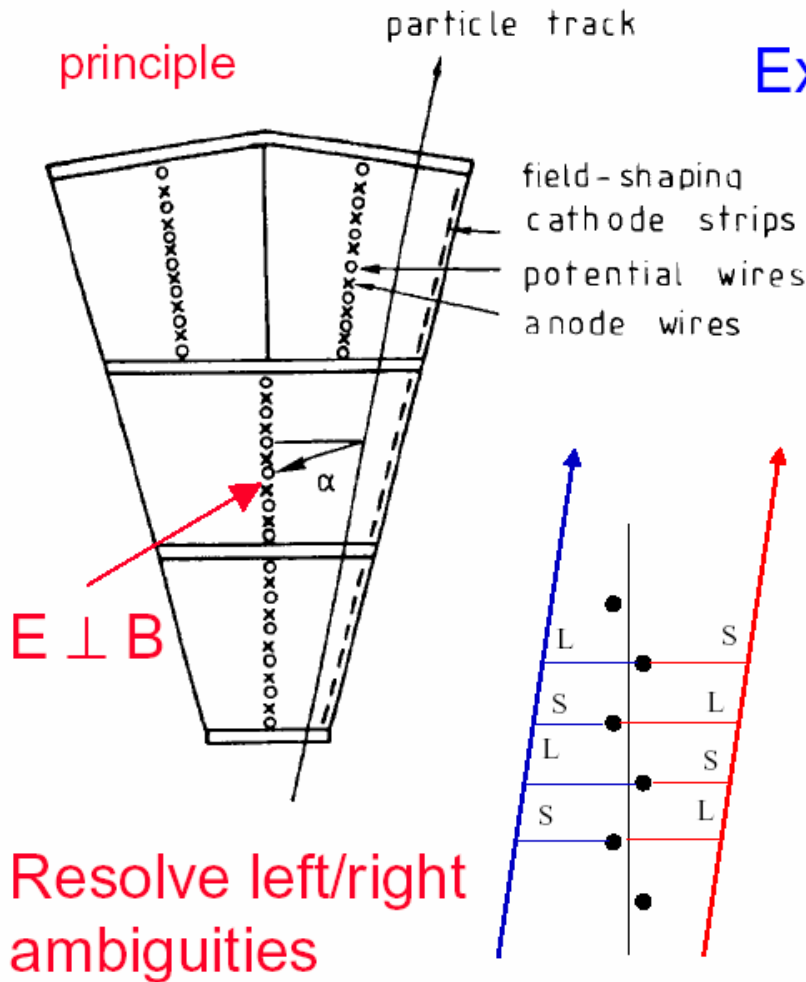


Détecteur  
central de UA1



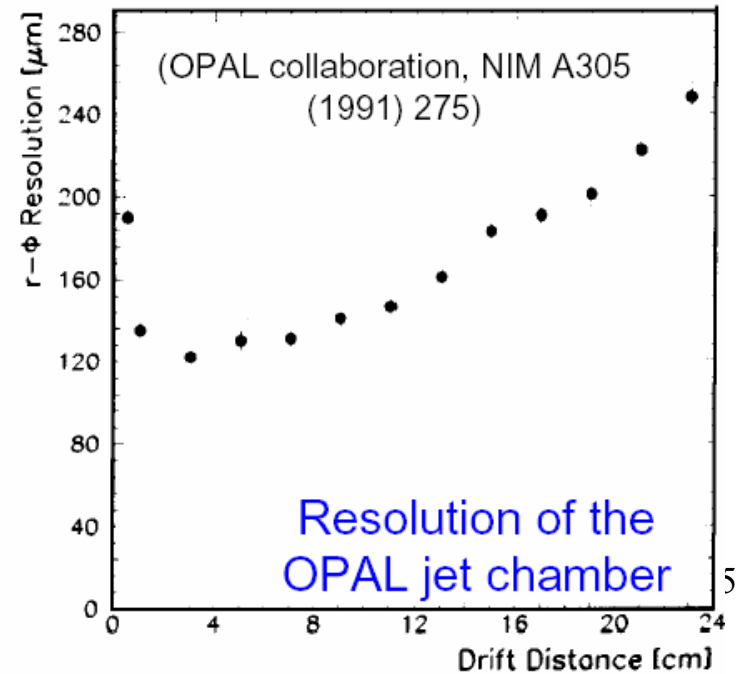
# Chambres à jet

Géométrie optimisée pour avoir le maximum de points de mesure dans la direction radiale



Example: OPAL Jet chamber

$\varnothing=3.7\text{m}$ ,  $L=4\text{m}$ , 24 sectors à 159 sense wires ( $\pm 100\ \mu\text{m}$  staggered).  $3\ \text{cm} < l_{\text{drift}} < 25\ \text{cm}$





# Geiger vs Linear Operation

Linear Operation:

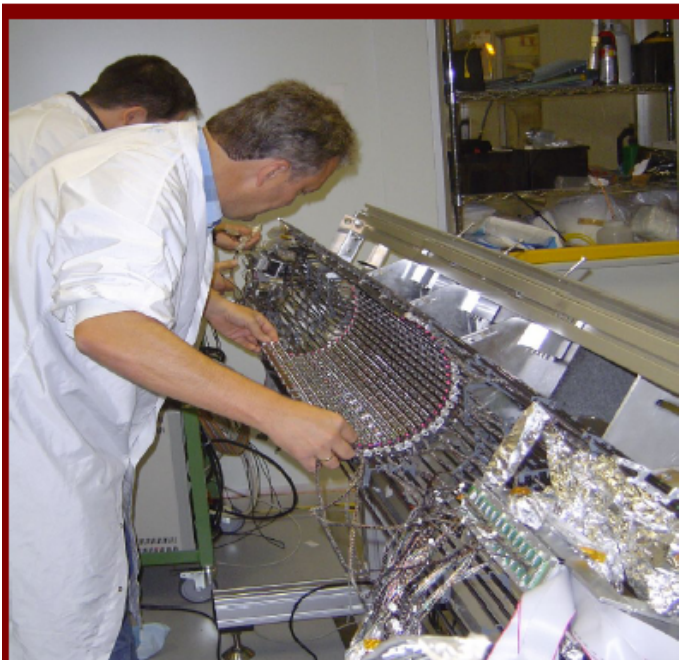
Diode biased below breakdown.  
Well defined small-signal gain.

Geiger Operation:

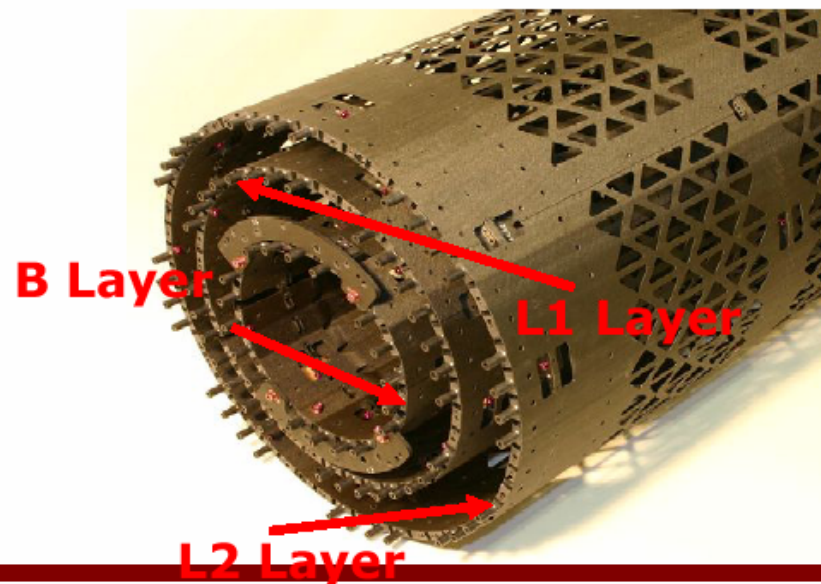
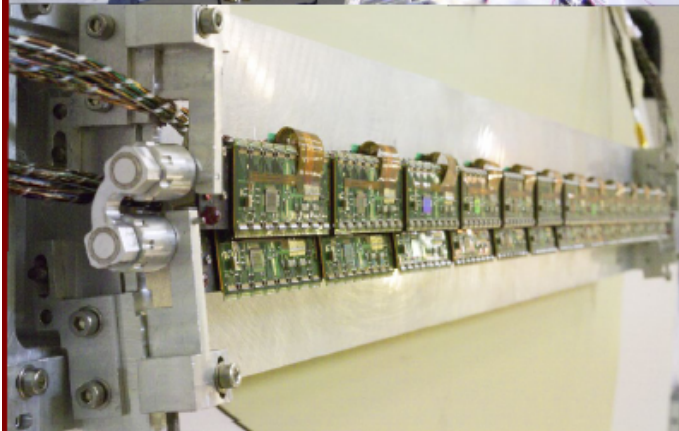
Diode biased above breakdown.  
Single electron leads to run-away  
gain until quenched.  
Noisy:  $10^2$ - $10^5$  cps/channel

(also Poster/Abs 143, Renker)

# Pixels ATLAS

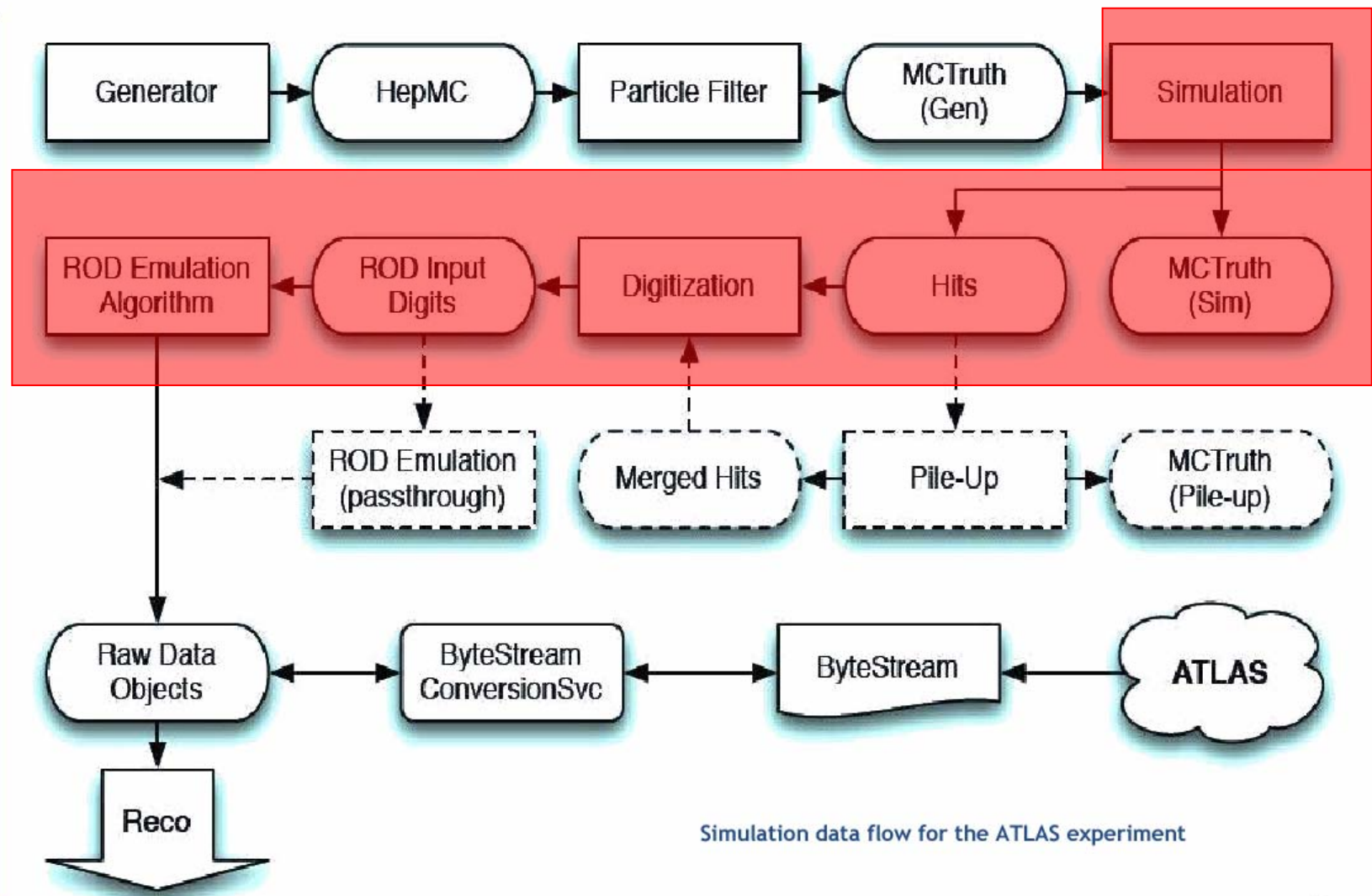


- carbon-carbon support ladder
- integrated cooling pipe
- 13 modules per stave
- bi-staves with cooling U-Link are inserted into half-shells
- finally clamping of half-shells

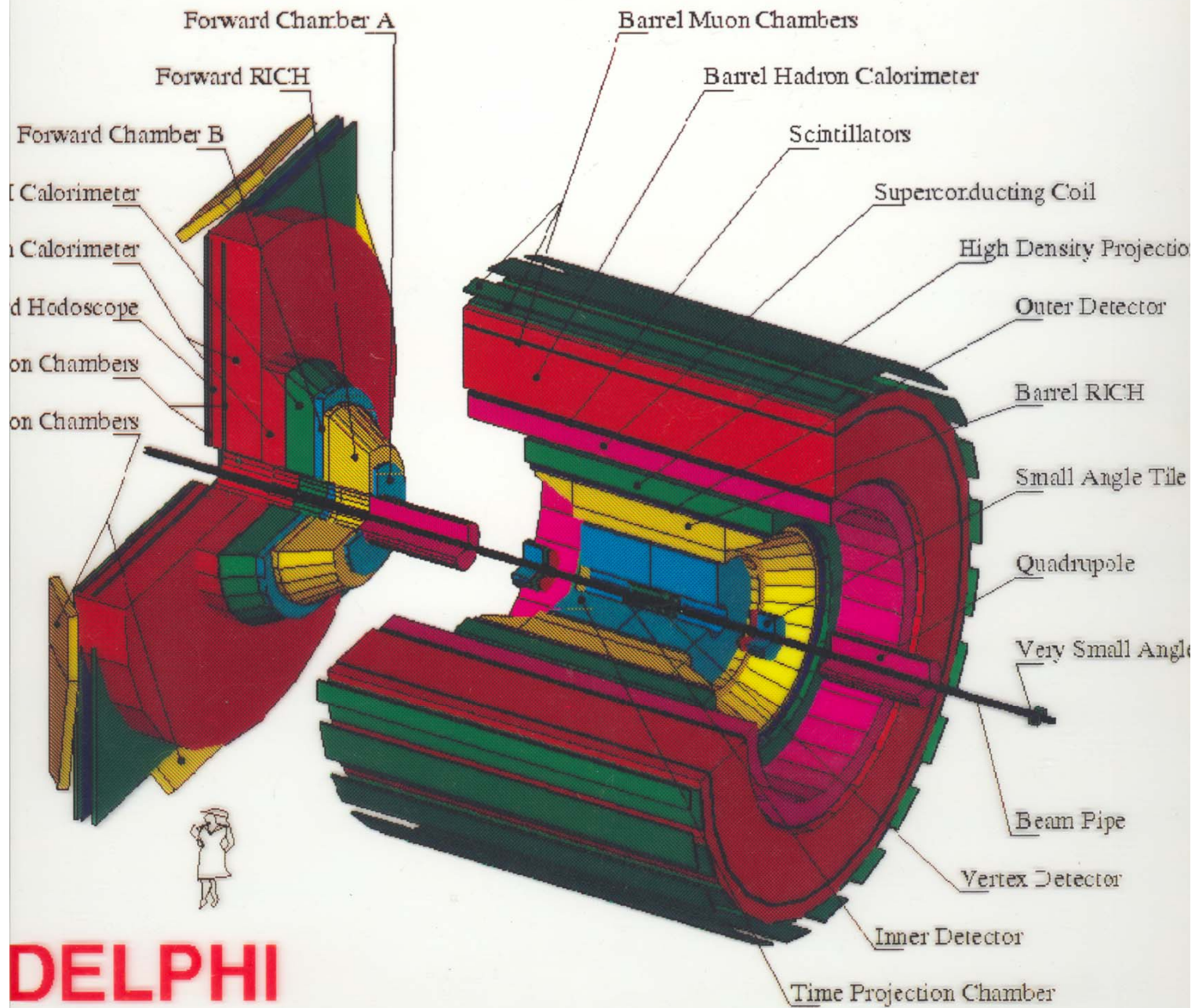


# Simulation

## Simulation data flow



Simulation data flow for the ATLAS experiment

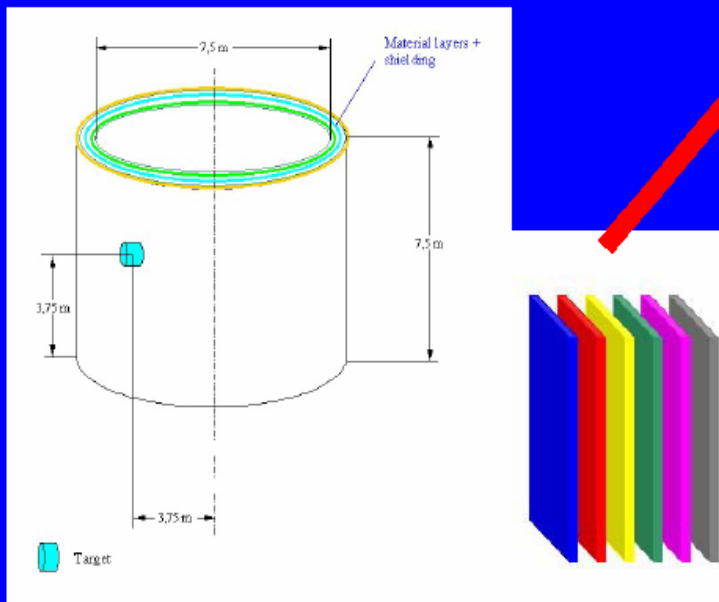
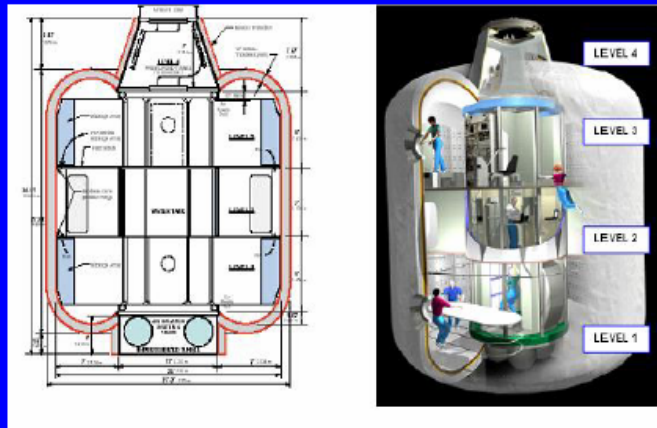


**DELPHI**

# Inflatable habitat

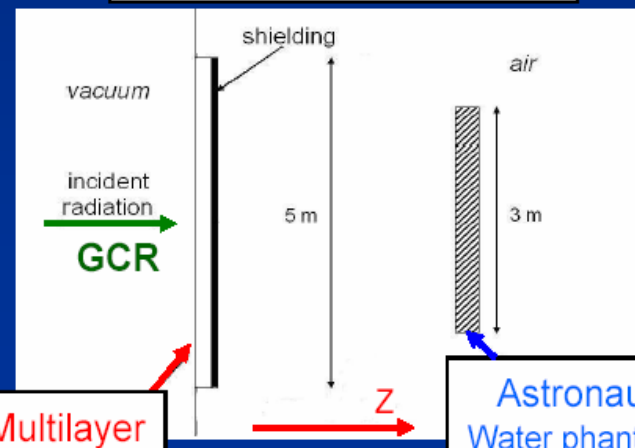
## Multilayer structure

- External thermal protection blanket
  - *Betacloth and mylar*
- Meteoroid and debris protection
  - *Nextel (bullet proof material) and open cell foam*
- Structural layer
  - *Kevlar*
- Redundant bladder
  - *Polyethylene, polyacrylate, EVOH, kevlar, nomex*



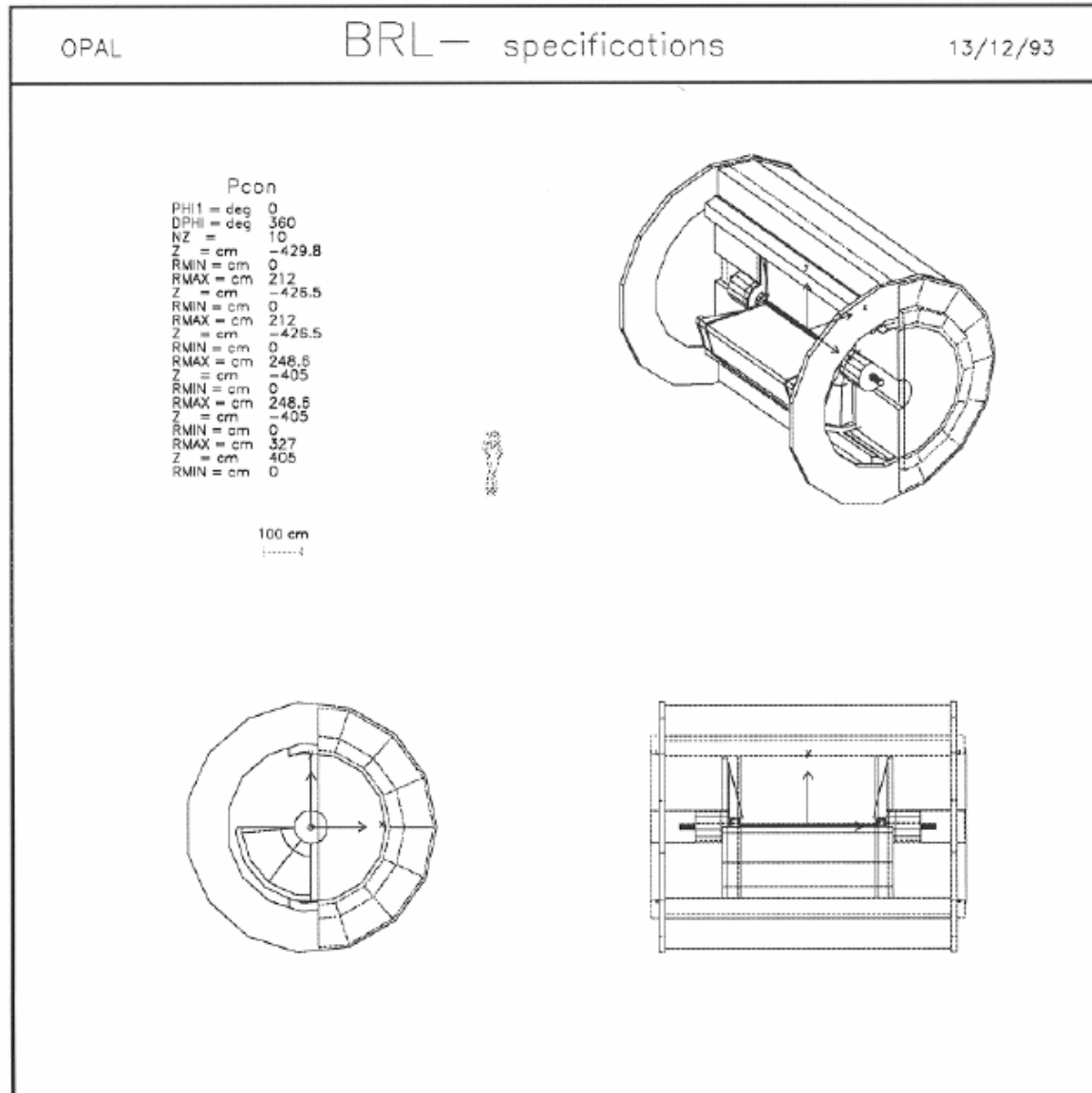
Engineering model by ALENIA SPAZIO

## Experimental set-up



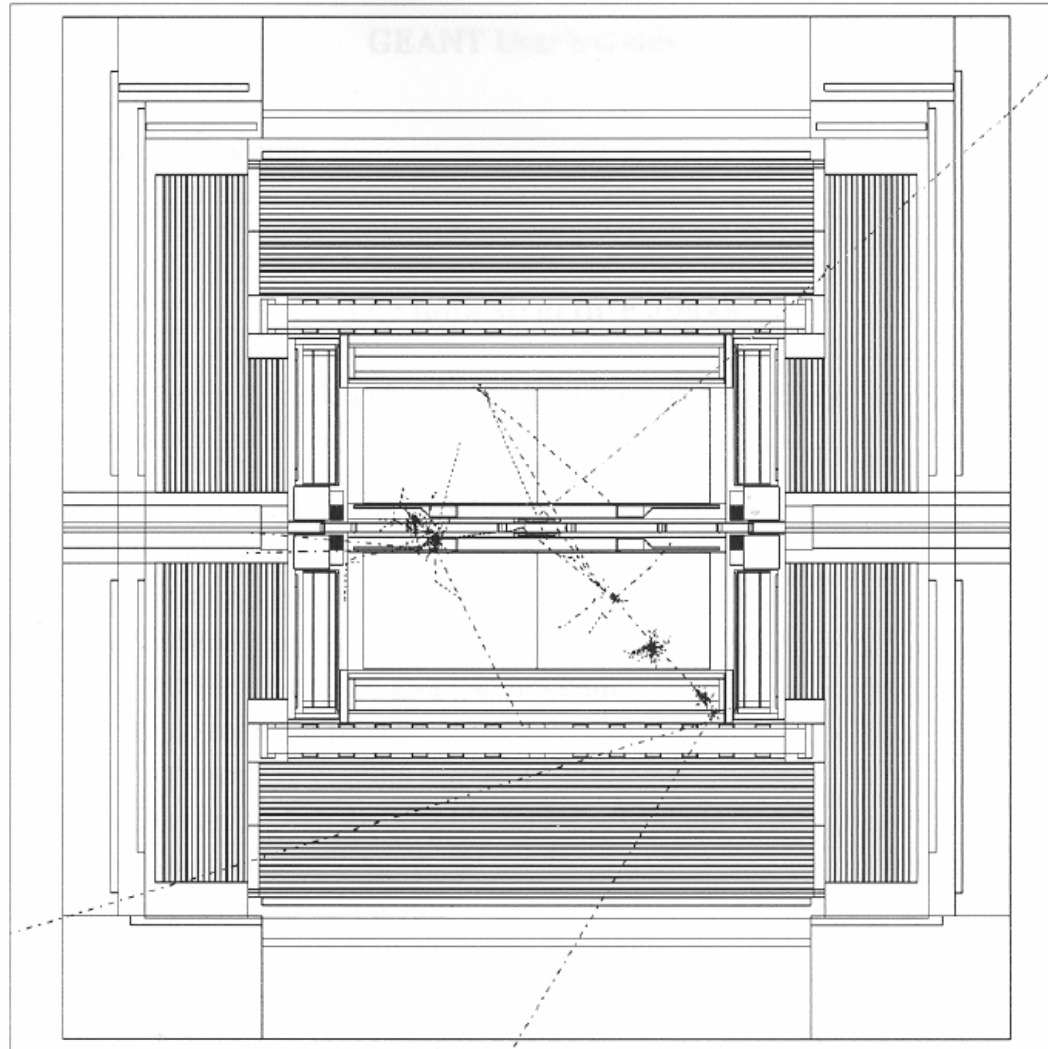
Simplified geometry  
Retains the essential characteristics for a  
shielding characterization

# Exemple de géométrie



# Simulation des interactions

ALEPH, LEP  
Peu de traces





# Interface entre GEANT et CAO

- Un rêve de physicien : être sûr que la géométrie utilisée par sa simulation est bien la même que celle que le mécanicien a dessinée dans Catia/Euclid/Pro Engineer/Autocad ...
- S'épargner des heures de calculs plus ou moins manuels, de mesure à partir de la CAO, et de saisie manuelle ensuite dans GEANT.

# Interfaçage GEANT-CAO

- L'idée n'est pas neuve...
- Développements au CERN dans les années 90
- EUGENIE (interface EUCLID-GEANT)
- Problème : impose une certaine discipline pour le dessinateur
- Qu'en sera-t-il à l'avenir ? Utilisation d'XML ? Mais interfaçage avec les formats CAO standard (IGES, DXF et autres ?)

# Power budget and distribution is key challenge

affects cooling, material budget, packaging and more

but “work on powering schemes and the like is not sexy”

*Example ATLAS Semiconductor Tracker SCT:*

cables too long (up to 160 m), cable resistance too high ( $\approx 3.5 \Omega$ ),  
6 M channels

↔ 50 kW power (modules and cables)

*Best estimate for SLHC tracker:*

30-60 M channels; 50 kW module power; 20% power efficiency

↔ 200 kW total power

**This is a power station not a tracker !**

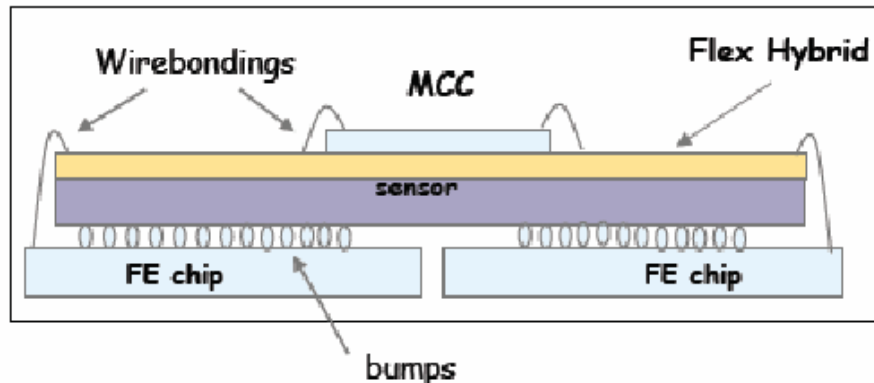
# Challenge: packaging

“Packaging is what makes your cell phone small”

How to stack sensors; MCMs; chips; CF support; cables and cooling while connecting them electrically, thermally and mechanically ?

- **innovative example: ATLAS pixels**

- sophisticated, crowded flex-hybrid
- carbon-carbon support structures
- bump-bonding of chips to sensors
- direct cooling of chips



# Il y a plus compliqué...

If now we set

$$\begin{aligned}
 Z_s &= \sum_{i=1}^N n_i Z_i (Z_i + 1) & &= W \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{A_i} Z_i (Z_i + 1) & &= W Z'_s \\
 Z_E &= \sum_{i=1}^N n_i Z_i (Z_i + 1) \ln Z_i^{-2/3} & &= W \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{A_i} Z_i (Z_i + 1) \ln Z_i^{-2/3} & &= W Z'_E \\
 Z_x &= \sum_{i=1}^N n_i Z_i (Z_i + 1) \ln \left[ 1 + 3.34 \left( \frac{\alpha Z_i Z_{inc}}{\beta} \right)^2 \right] \\
 &= W \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{A_i} Z_i (Z_i + 1) \ln \left[ 1 + 3.34 \left( \frac{\alpha Z_i Z_{inc}}{\beta} \right)^2 \right] & & & &= W Z'_x
 \end{aligned}$$

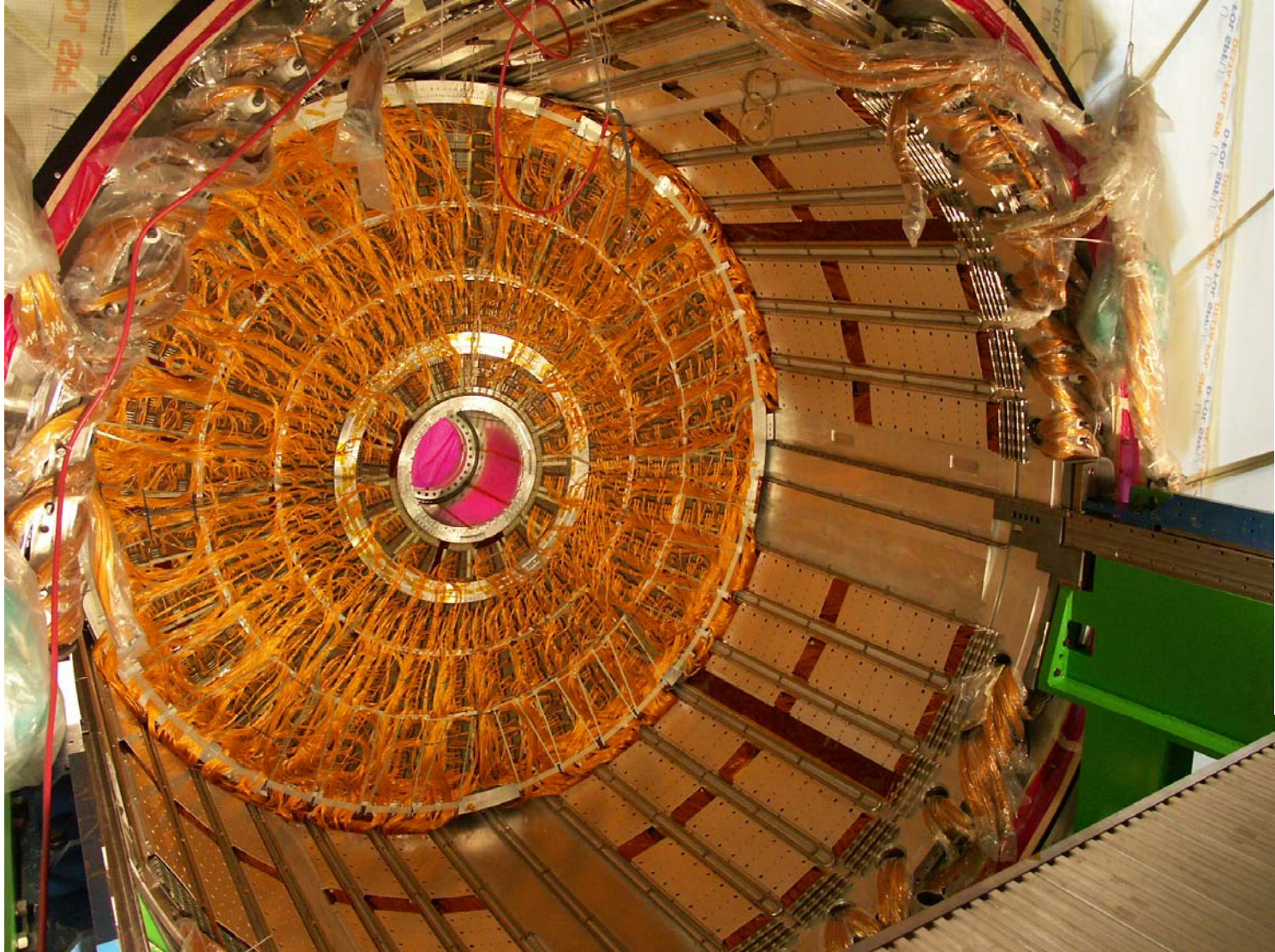
we can write:

$$\begin{aligned}
 \ln(\chi_\alpha^2) &= \ln \left( \frac{m^2 e^{4.13}}{p^2 \hbar^2 (0.885)^2} \right) + \frac{Z_x - Z_E}{Z_s} \\
 \chi_\alpha^2 &= \frac{m^2 e^{4.13}}{p^2 \hbar^2 (0.885)^2} e^{(Z_x - Z_E)/Z_s} = \frac{m^2 e^{4.13}}{p^2 \hbar^2 (0.885)^2} e^{(Z'_x - Z'_E)/Z'_s}
 \end{aligned}$$

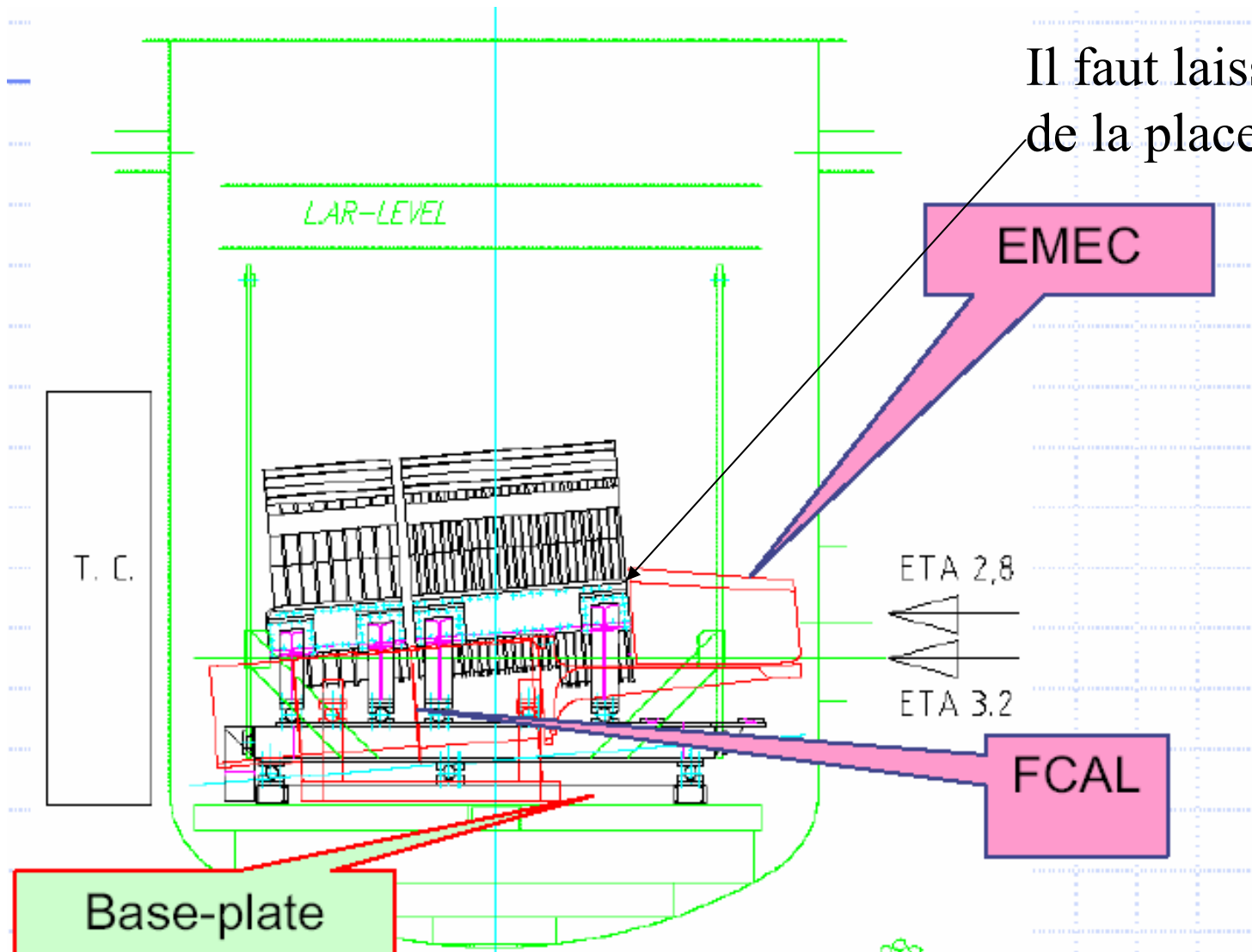
and finally:

$$\begin{aligned}
 \Omega_0 &= \frac{\chi_c^2}{e^{2\gamma-1} \chi_\alpha^2} \\
 &= \frac{1}{1.167} \frac{4\pi e^4 Z_s \rho N_{Av} Z_{inc}^2 t}{W c^2 p^2 \beta^2} \frac{p^2 \hbar^2 (0.885)^2}{1.13 m^2 e^4} e^{-(Z'_x - Z'_E)/Z'_s} \\
 &= b_c Z_{inc}^2 \frac{t}{\beta^2} \\
 b_c &= \frac{4\pi N_{Av} \hbar^2}{m^2 c^2} \frac{(0.885)^2}{1.13 \times 1.167} \rho Z'_s e^{(Z'_E - Z'_x)/Z'_s} \approx 6702.33 \rho Z'_s e^{(Z'_E - Z'_x)/Z'_s}
 \end{aligned}$$

# Un câblage propre



# Problèmes d'interface entre détecteurs



Il faut laisser de la place !

EMEC

T. C.

LAR-LEVEL

ETA 2,8

ETA 3.2

FCAL

Base-plate

# GEANT : vaste gamme d'applications

[Download](#) | [User Forum](#) | [Gallery](#) | [Site Index](#)  
[Contact Us](#)

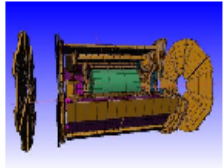
## Geant 4

  
Search Geant4

[Home](#) > [Applications](#)

### Applications

#### High Energy Physics



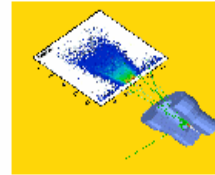
>> [more high energy physics](#)

#### Space and Radiation



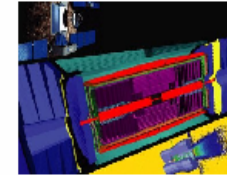
>> [more space and radiation](#)

#### Medical



>> [more medical](#)

#### Technology Transfer



>> [more technology transfer](#)

[Applications](#) | [User Support](#) | [Results & Publications](#) | [Collaboration](#) | [Site Map](#)

[Contact Webmaster](#)

Last update: 11/14/2006 11:40:32