

Identification des particules

**ECOLE IN2P3
DU DETECTEUR A LA MESURE**

Roscoff 13-21 juin 2007

P. Siegrist CERN-PH

Préambule

- L'identification des particules est un champ très vaste de la physique expérimentale des particules et sans doute un des plus complexes.
- Ce cours n'a pas la prétention de couvrir tous les domaines mais se cantonnera aux techniques les plus couramment utilisées en physique des particules
- Il n'y aura pas de calculs formels mais seulement l'énoncé de quelques formules
- Les exemples expérimentaux choisis seront volontairement gardés simples pour leur description
- Les choix d'expériences pour illustrer par l'exemple sont arbitraires et les erreurs éventuelles de ma seule responsabilité...

Définitions

- **Les particules à durée de vie courte** sont généralement identifiées par leurs produits de désintégrations → traces, vertex secondaire, détecteurs de vertex
- **Neutrinos**: déficit dans le bilan d'énergie ou d'impulsion de la réaction . Neutrino \equiv Energie manquante
- **Electrons photons et π^0** → gerbes électromagnétiques dans les calorimètres.
- **Les Muons**: parcours et pouvoir de pénétration spécifique
- **Hadrons chargés (π , K, p)**: ce sont les particules les plus difficiles à distinguer. C'est principalement à ce dernier groupe que se rapportent les notions d'identification que l'on va développer.

Méthode d'identification

- L'identification d'une particule se fait en général par la mesure de sa masse
- Pour mesurer la masse il faut toujours mesurer 2 quantités l'impulsion et l'énergie ou l'impulsion et la vitesse ou des quantités s'y rapportant (temps de vol, θ_c ...)
- On utilise les définitions et relations suivantes entre la vitesse v , le facteur de Lorentz γ , l'impulsion p , l'énergie E et la masse m .

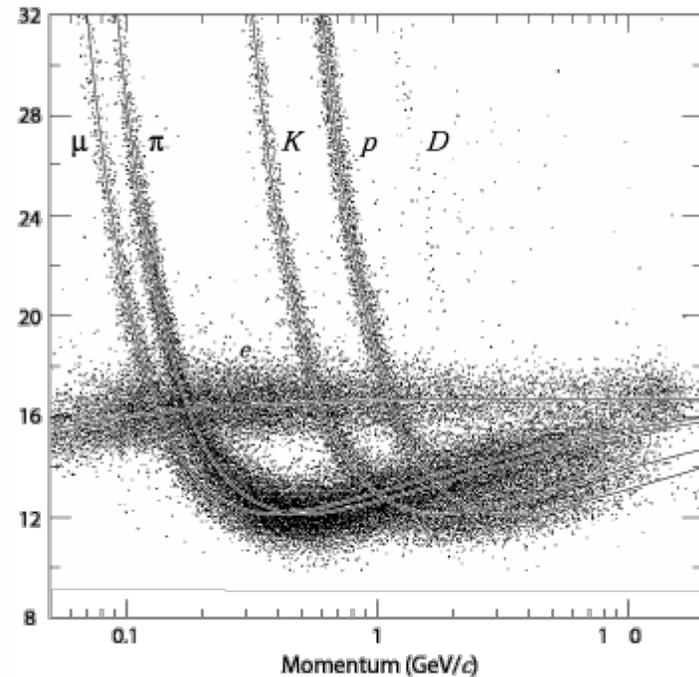
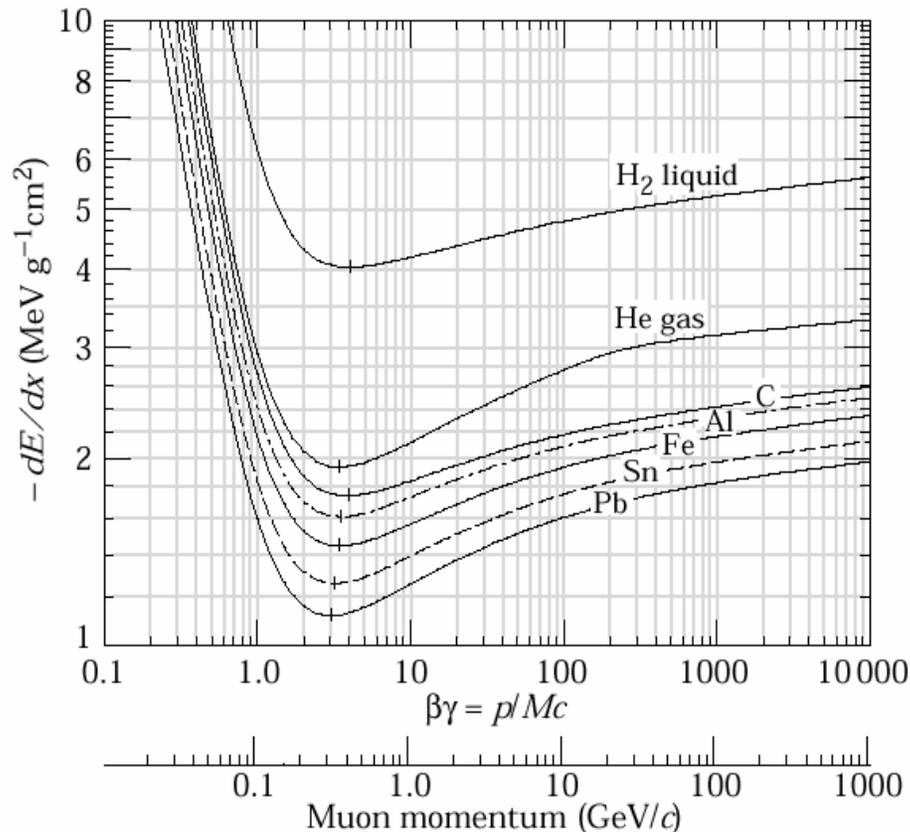
$$\mathbf{v} = \mathbf{p}/E , \quad \gamma = (1-v^2)^{-1/2} = E/m , \quad E^2 = p^2 + m^2$$

Les phénomènes physiques utilisés

- Perte d'énergie par ionisation → **dE/dx**
- Mesure de temps de vol → **TOF**
- Effet Cerenkov → **Č**
- Rayonnement de transition → **TRD**

dE/dx Formule de Bethe-Bloch

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

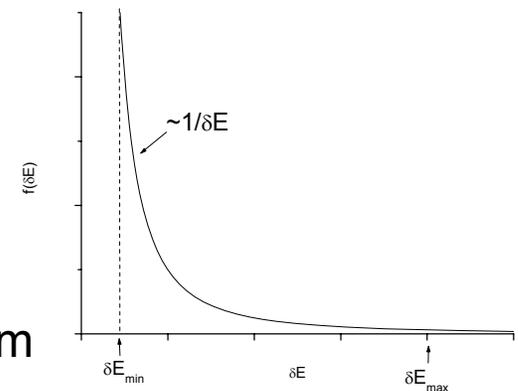


dE/dx Remarques

- Perte d'énergie par ionisation
- Collision de la particule lourde chargée avec les électrons atomiques du milieu traversé
- dE/dX dépend que de β et pas de la masse
- Il faut également mesurer p !

dX limité à $\delta x \rightarrow$ fluctuations de Landau

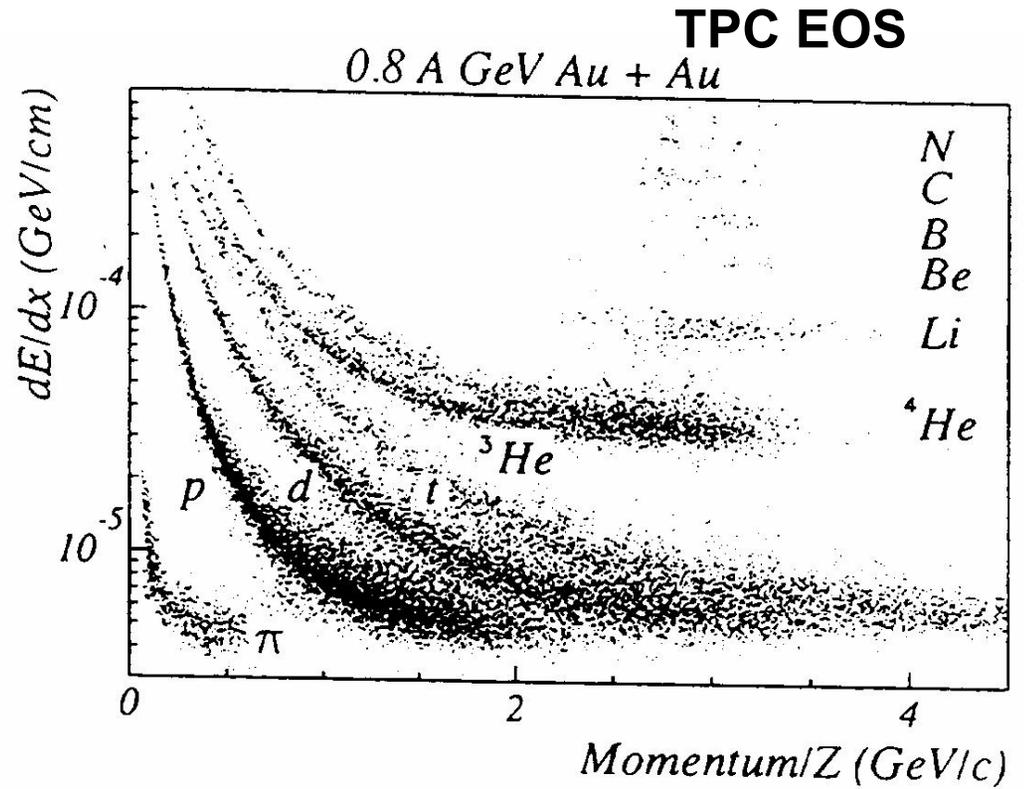
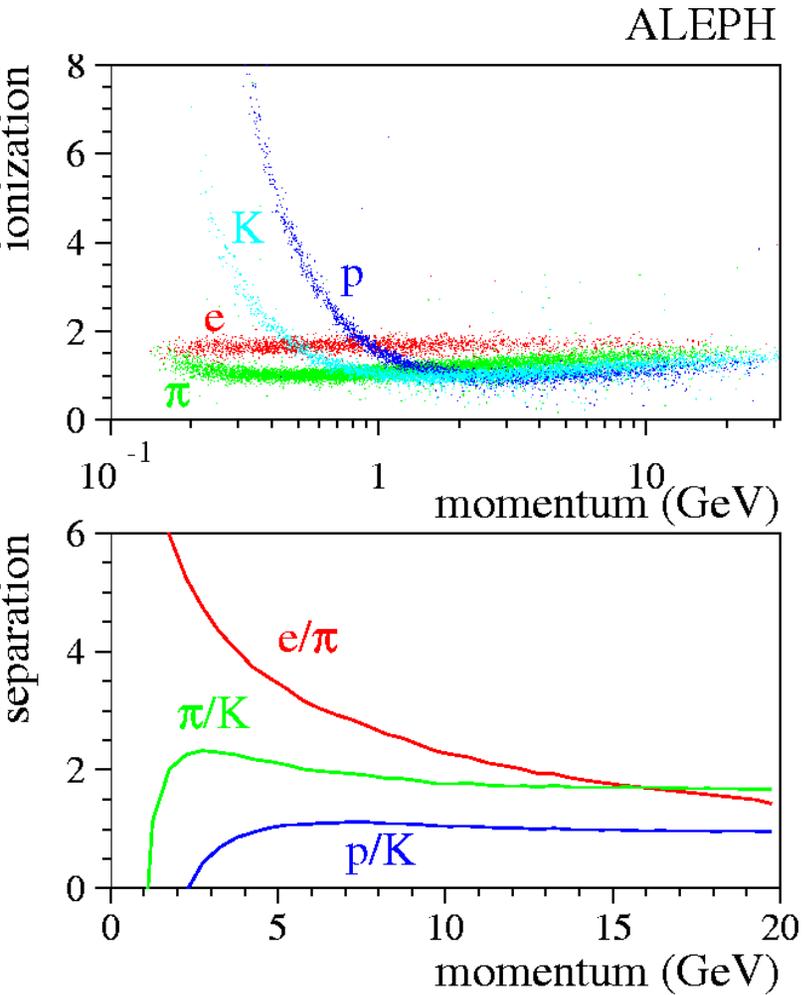
En général moyenne tronquée à 80% du maximum d'amplitude



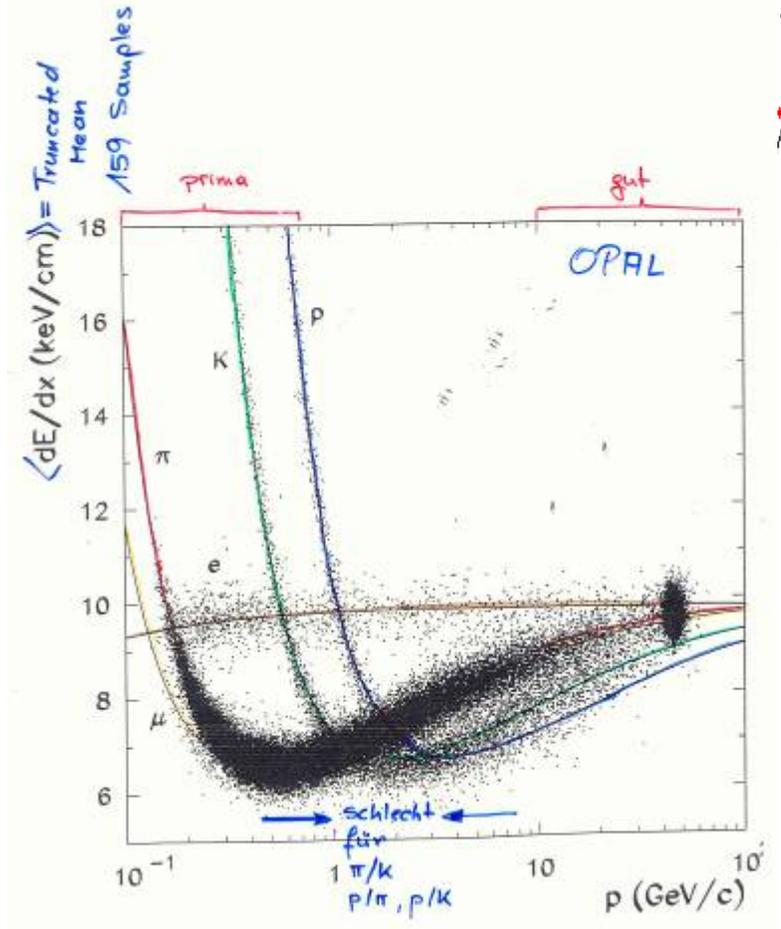
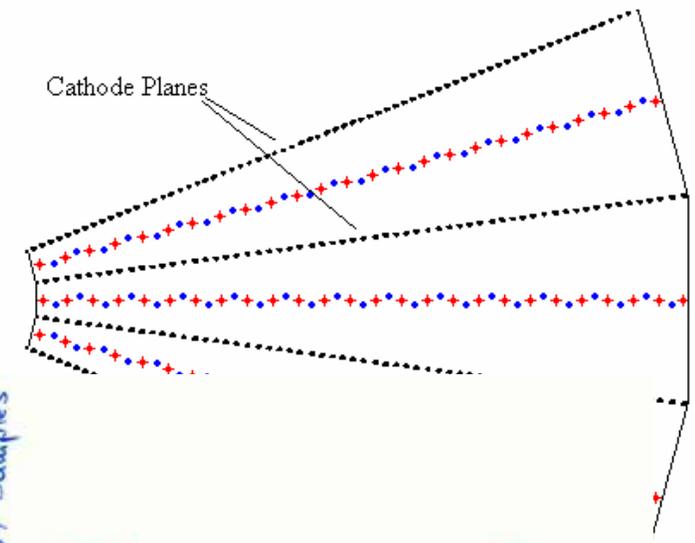
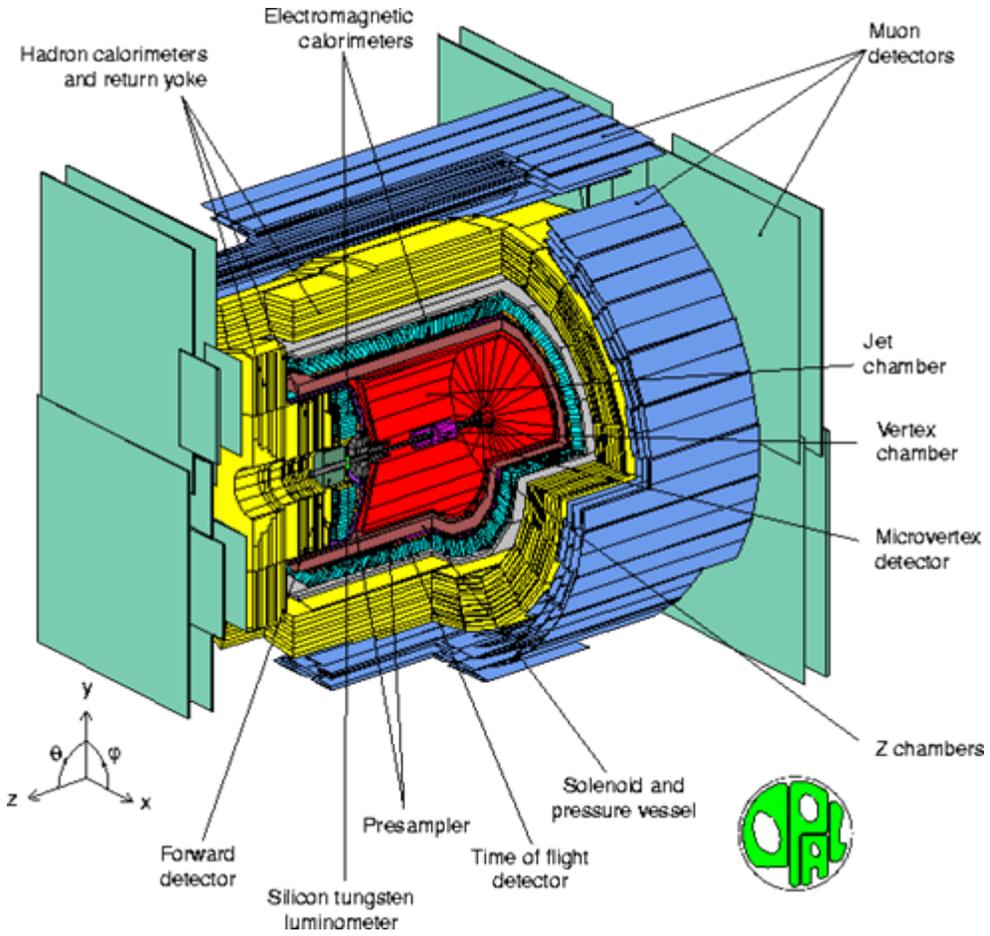
Identification par dE/dx

- Utilisée dans toutes les expériences avec chambres à dérive
 - Exemples d' autres chambres à dérive:
OPAL, CDF,
 - TPC PEP4, Aleph, Delphi, Ions lourds...
- Utilisée pour les détecteurs silicium
 - CDF,

TPC dE/dx



OPAL



CDF COT



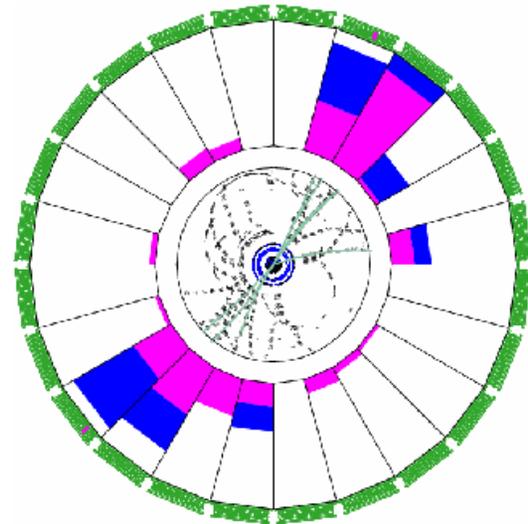
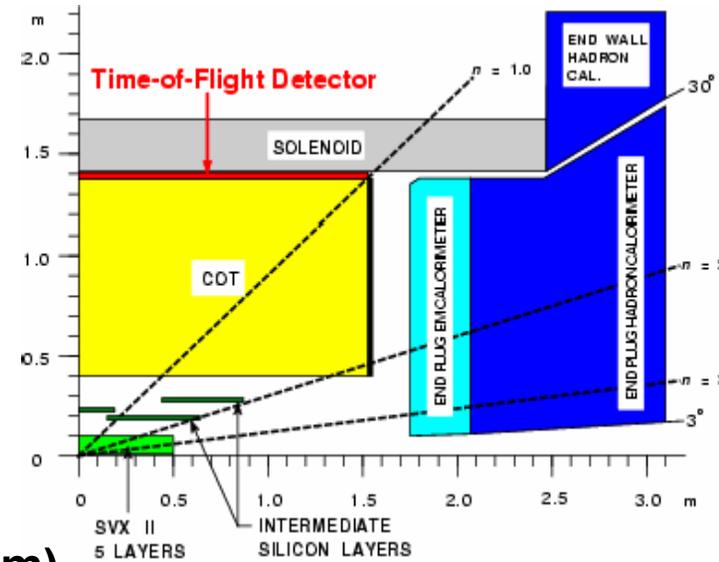
$L = 310$ cm

$R = 43\text{-}132$ cm

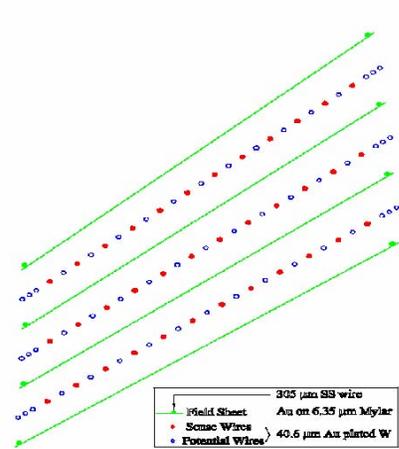
8 couches
(2520 cellules)

30 000 fils
sensibles

Traces ($\sigma = 180$ μm)
et dE/dx (96 fils/tr)



CDF COT dE/dx

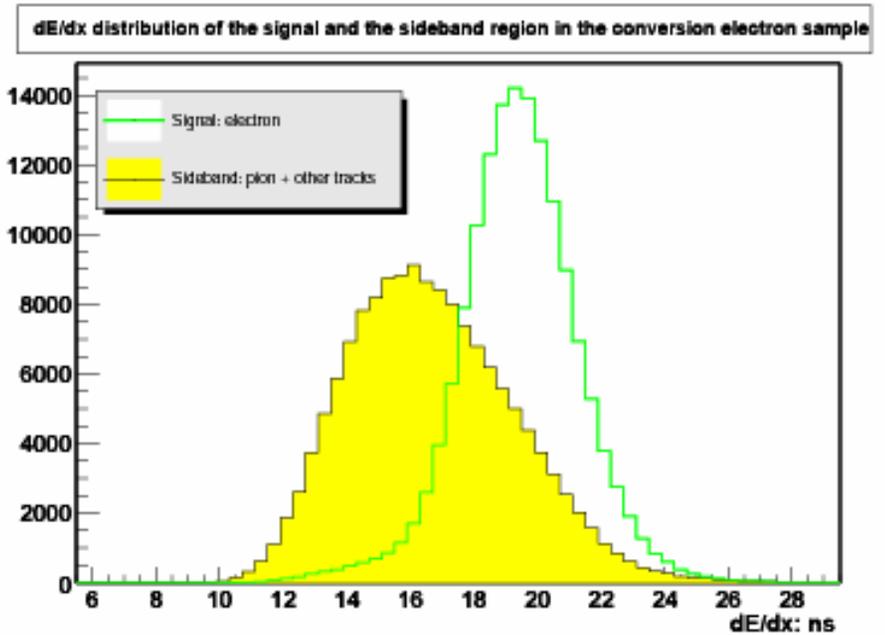
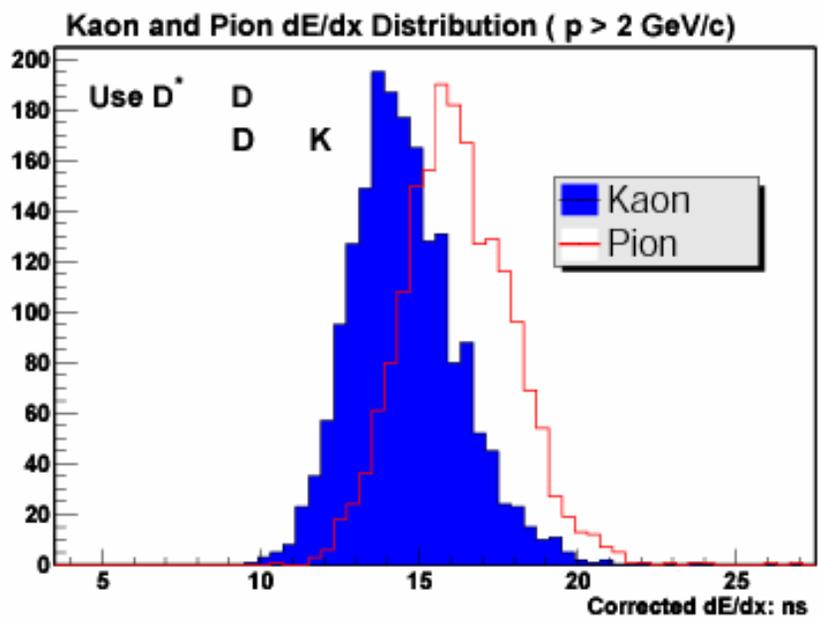


Séparation K- π : 1.6 ns ($\sigma=1.6$ ns)

Séparation de 1- σ jusqu' à 10 GeV/c, ensuite tombe à 0.75 s à 30 GeV/c

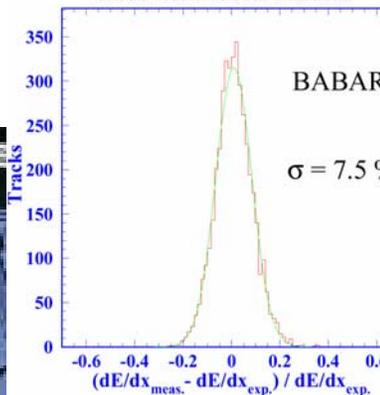
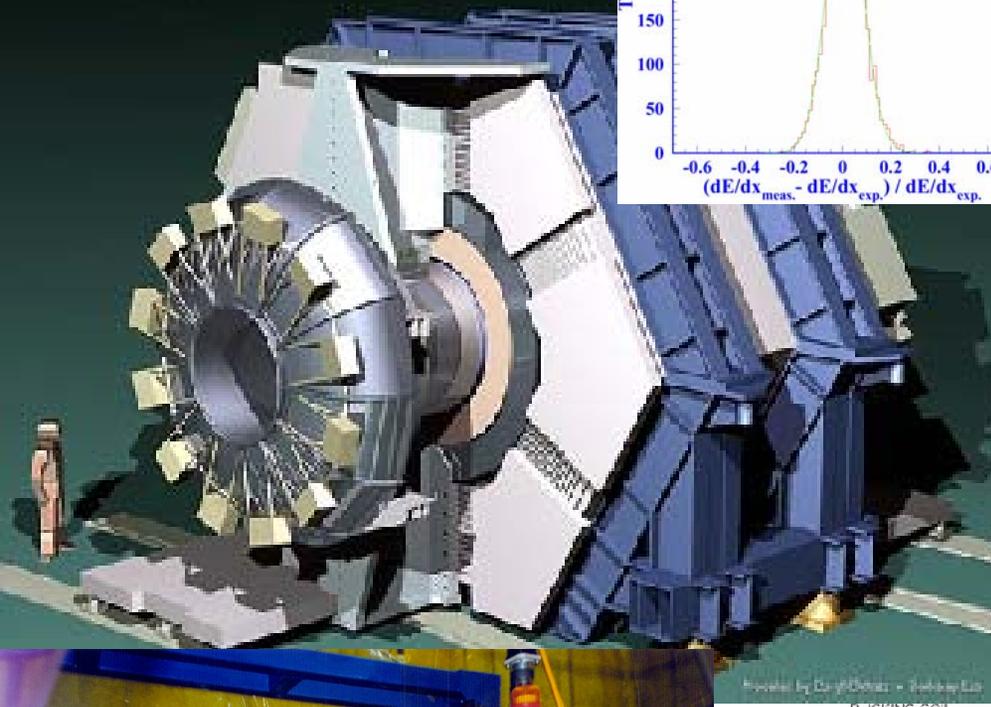
Séparation e - π

Séparation 2.7 ns ($\sigma = 2$ ns) en dessous de 4 GeV/c. Décroit avec p

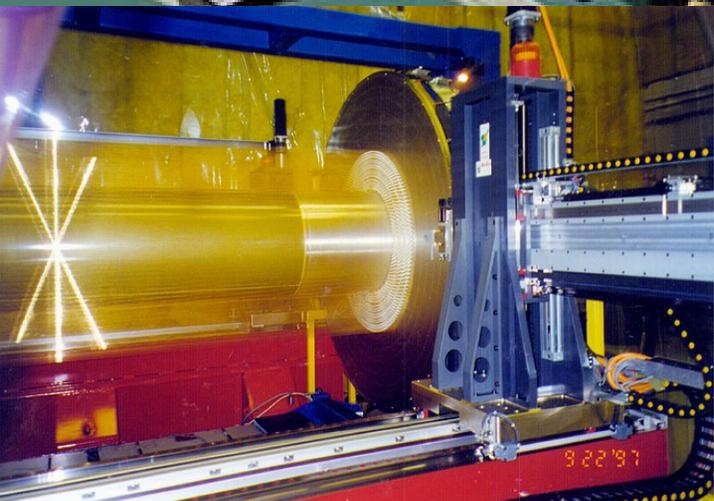
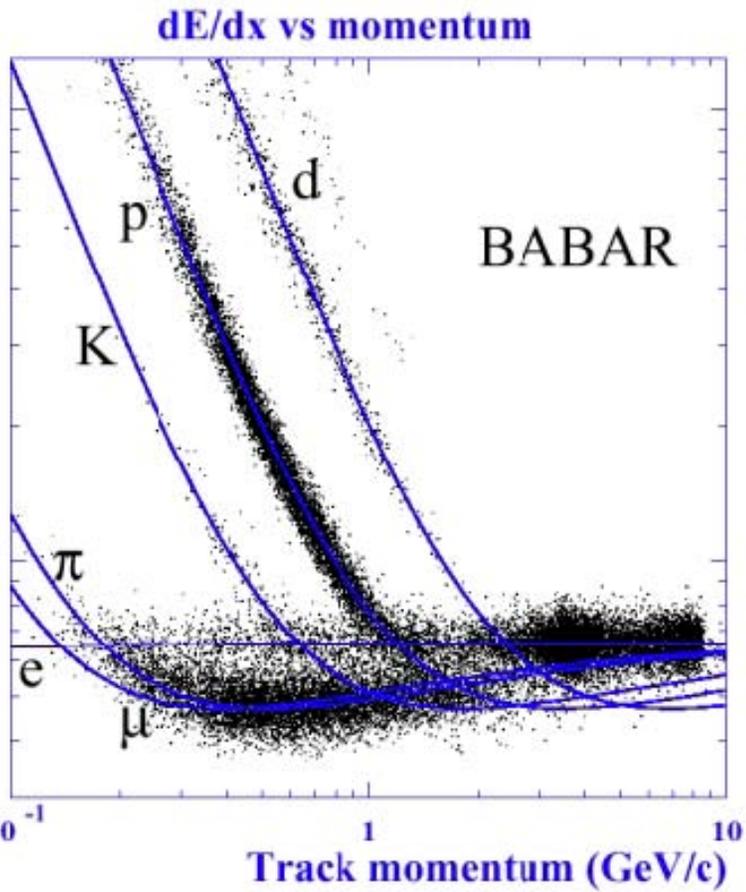


BaBar dE/dx

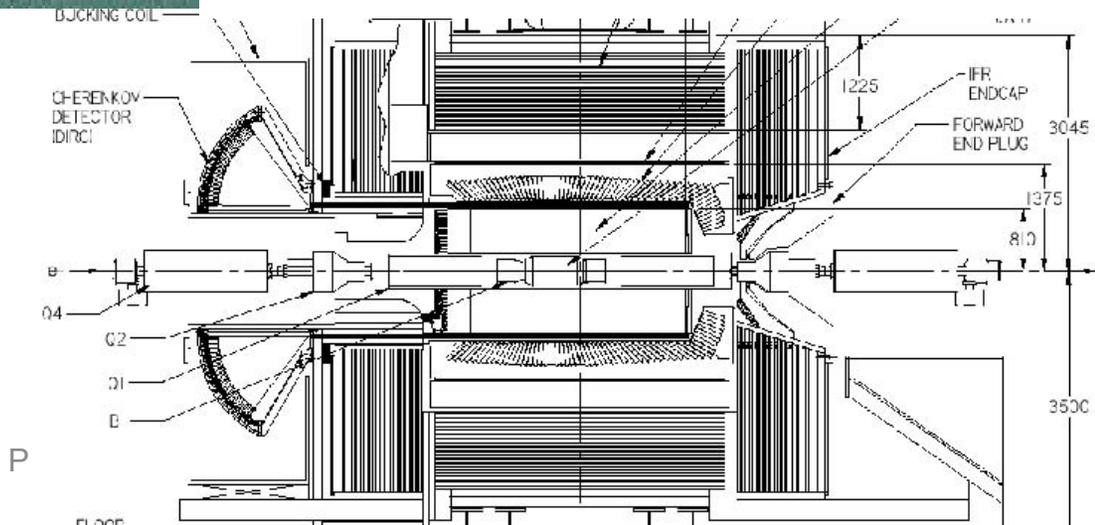
BABAR DETECTOR FOR THE PEP-II



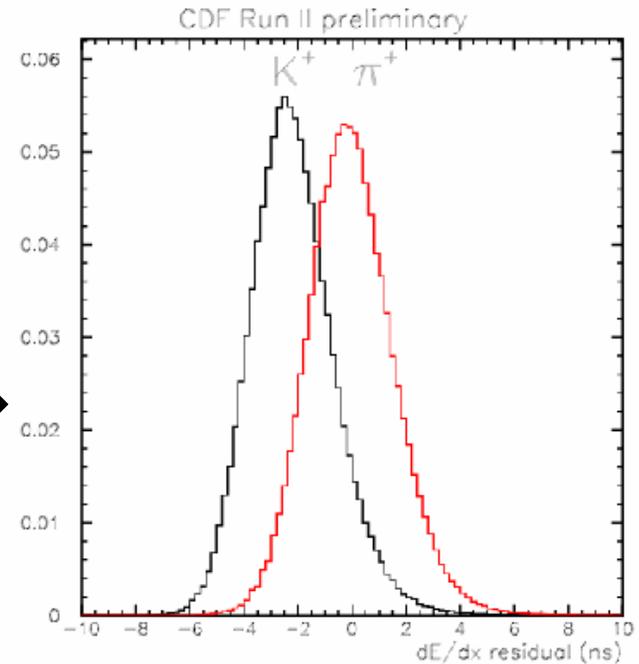
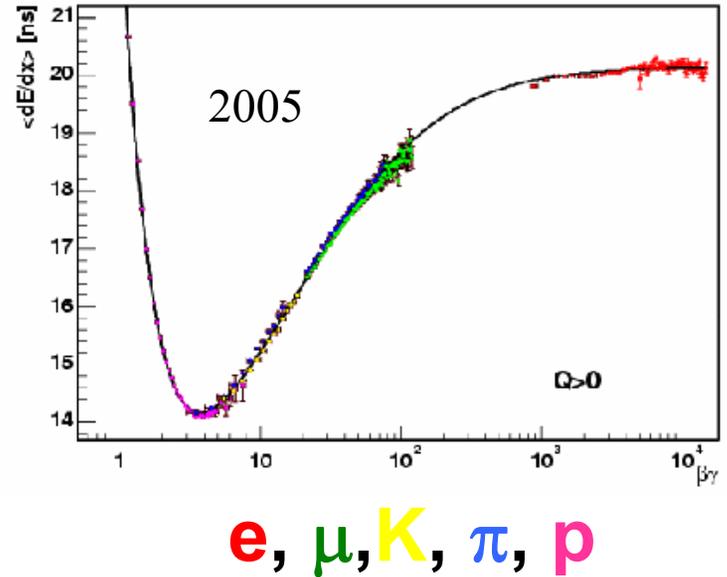
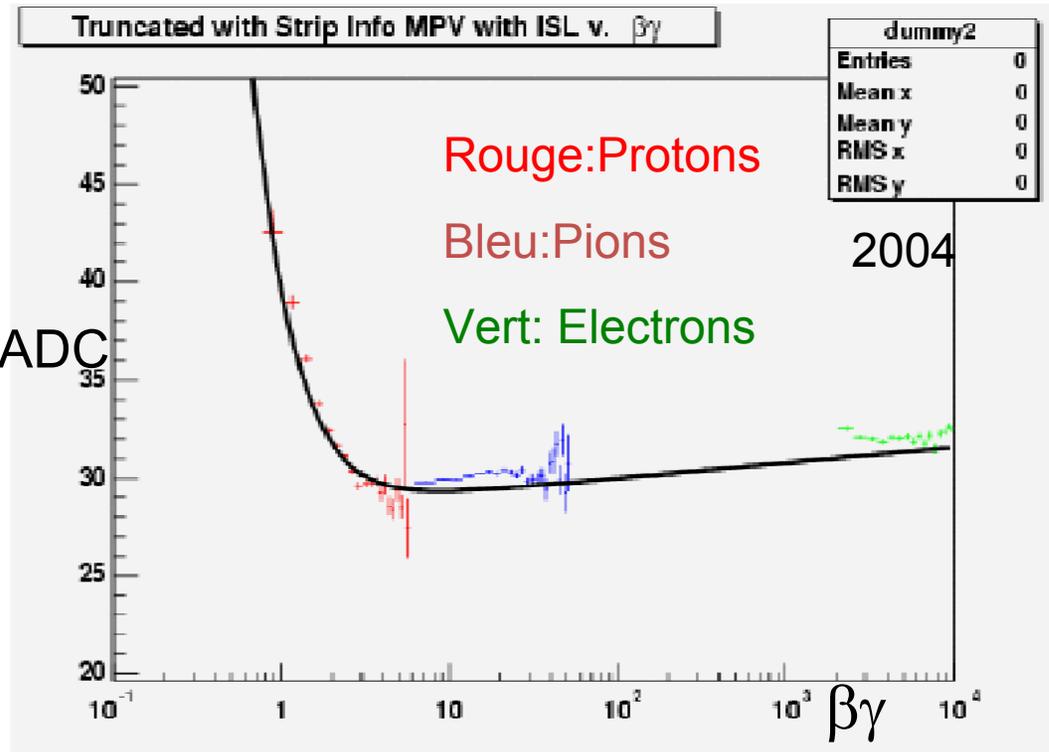
80% truncated mean (arbitrary units)



Roscoff juin 2007



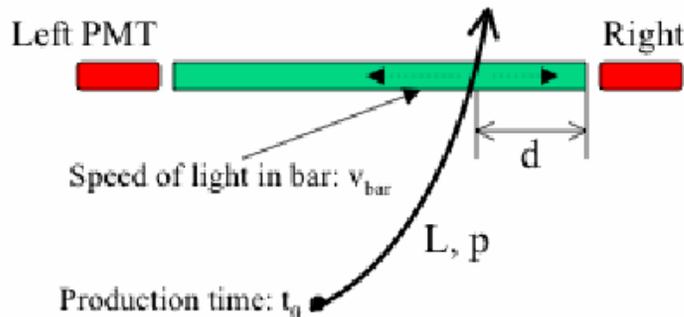
CDF Si dE/dx



P- π séparation jusqu' à 1.36 GeV (à 1σ)
K-p séparation jusqu' à 0.71 GeV (à 1σ)

Combinaison dE/dx chambre à dérivate + dE/dx Si \rightarrow
Séparation K- π 1.4σ

Temps de vol CDF



$$T = T_{hit} - d/v_{bar} - T_0$$

Résolution typique ~ 100 ps

Si on connaît p (ch. à dérive + Si)

Alors

$$m = p/c (c^2 T^2 / L^2 - 1)^{1/2} \rightarrow$$

En général TOF toujours associe à une autre identification, dE/dx , \check{C}

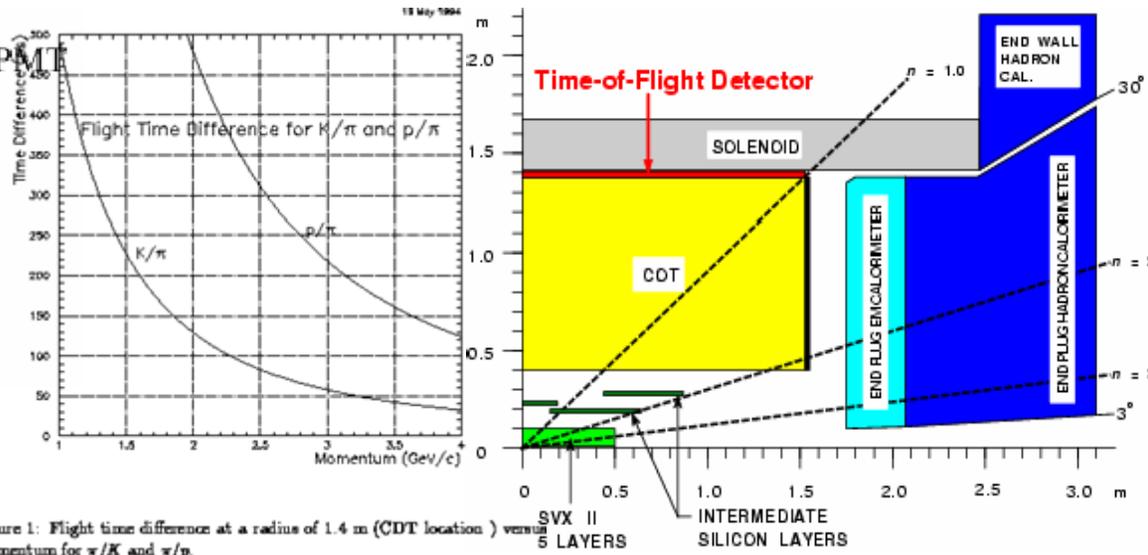
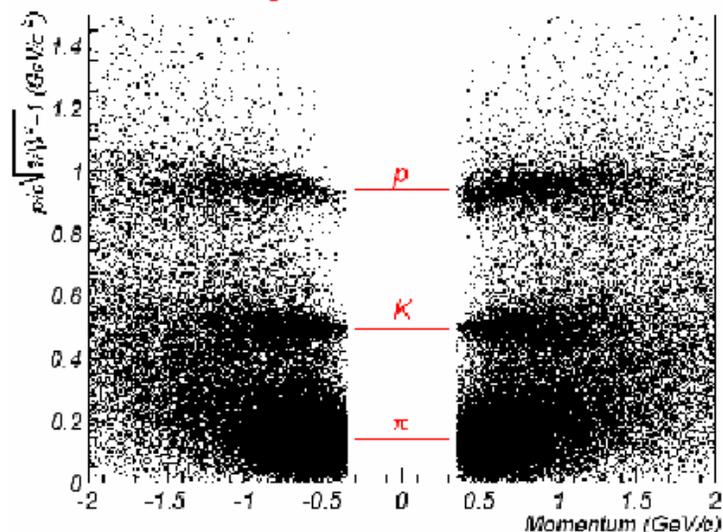
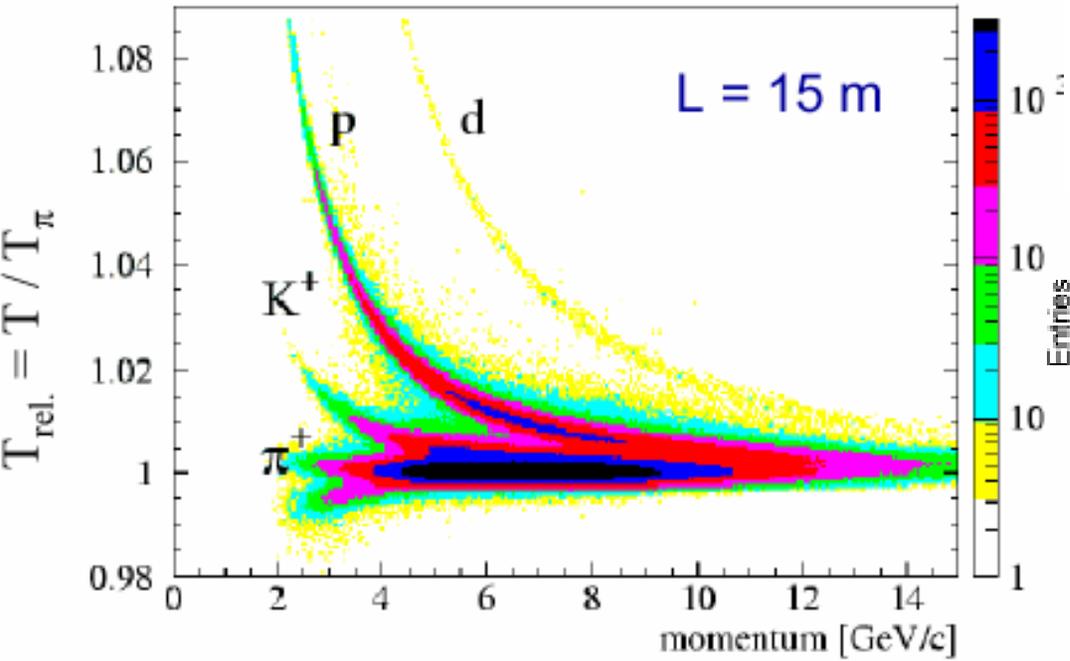


Figure 1: Flight time difference at a radius of 1.4 m (CDT location) versus momentum for w/K and w/p .

CDF Time-of-Flight : Tevatron store 860 - 12/23/2001

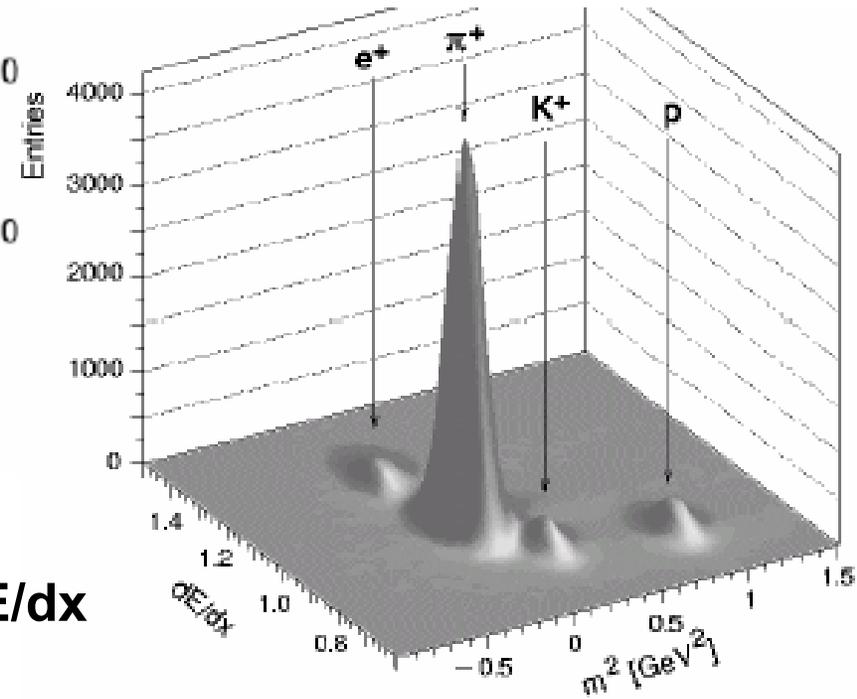


Temps de vol NA49

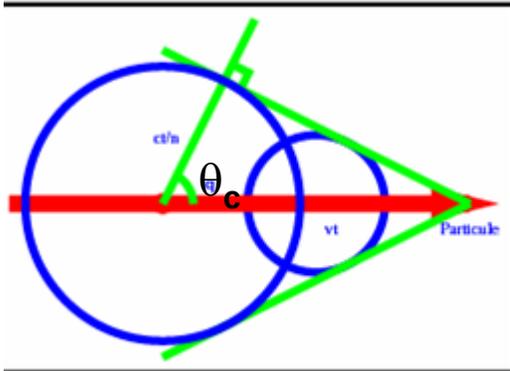


TOF

+ dE/dx



Effet Cerenkov Ć



Dans un milieu d'indice de réfraction n où la vitesse de la lumière est c/n si une particule se déplace avec une vitesse $v > c/n$, il y a création d'une onde lumineuse qui se propage sous un angle θ_c par rapport à la direction de la particule, tel que $\text{Cos } \theta_c = d/l = (c/n)t / vt = c/vn$ et $\text{Cos } \theta_c \leq 1 \rightarrow v > c/n$

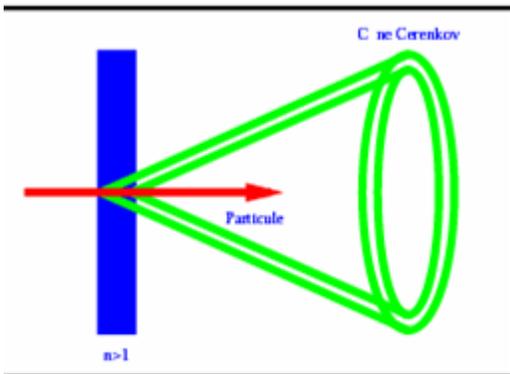
Emission à partir d'une vitesse limite minimum $v_{\text{lim}} = c/n$

Pour un milieu d'indice fixe on peut sélectionner les particules en prenant toutes celles qui ont $v > v_{\text{lim}}$

→ Ć à seuil

Avec des optiques sélectionnant les θ_c (cône) on mesure directement la vitesse:

→ Ć différentiel



Photons Č

$$\left. \frac{dN}{dx} \right|_{\text{Cerenkov}} = 2\pi \alpha Z^2 (\sin^2 \theta) \times \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right)$$

$$\beta \approx 1, n = 1.5, Z = 1, \rightarrow \left. \frac{dN}{dx} \right|_{\text{Cerenkov}} \approx 330 \text{ photons / cm avec } \lambda \text{ pour photo-tubes standards}$$

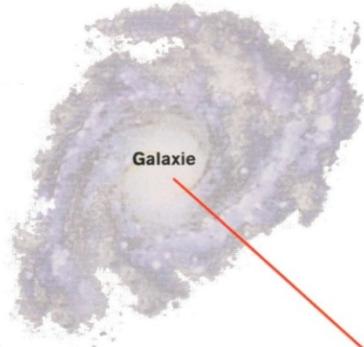
A comparer avec un scintillateur où

$$\left. \frac{dN}{dx} \right|_{\text{total}} \approx 17\,000 \text{ photons / cm} \rightarrow \sim \times 50$$

Exemple immédiat d'un "gros

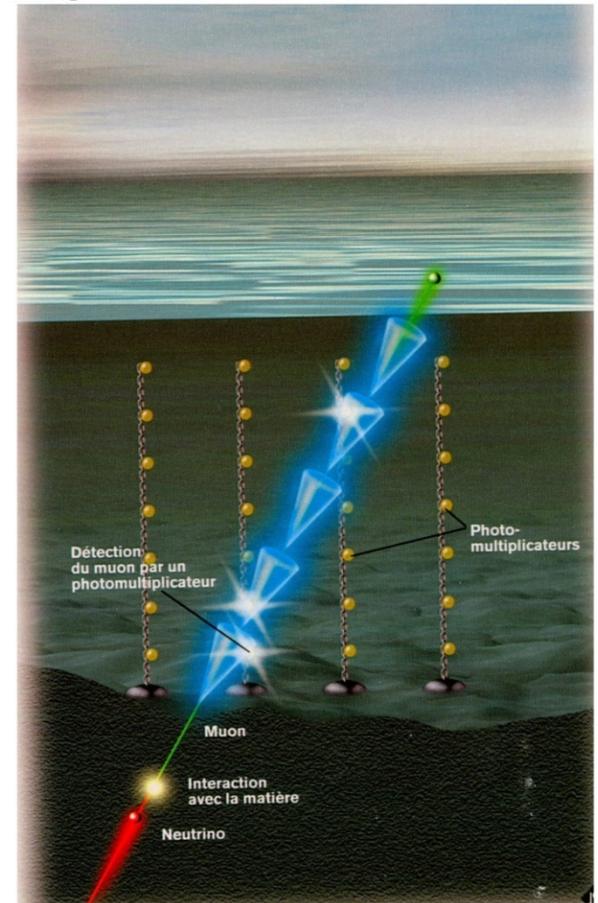
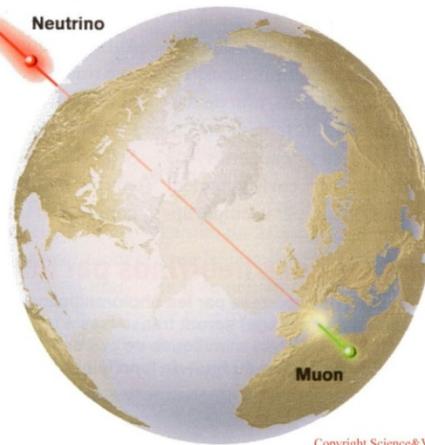
Cernekov":ANTARES

Lumière Cherenkov
détectée par des
photomultiplicateurs
placés dans des sphères
résistantes à la pression



Le neutrino interagit et
produit un muon

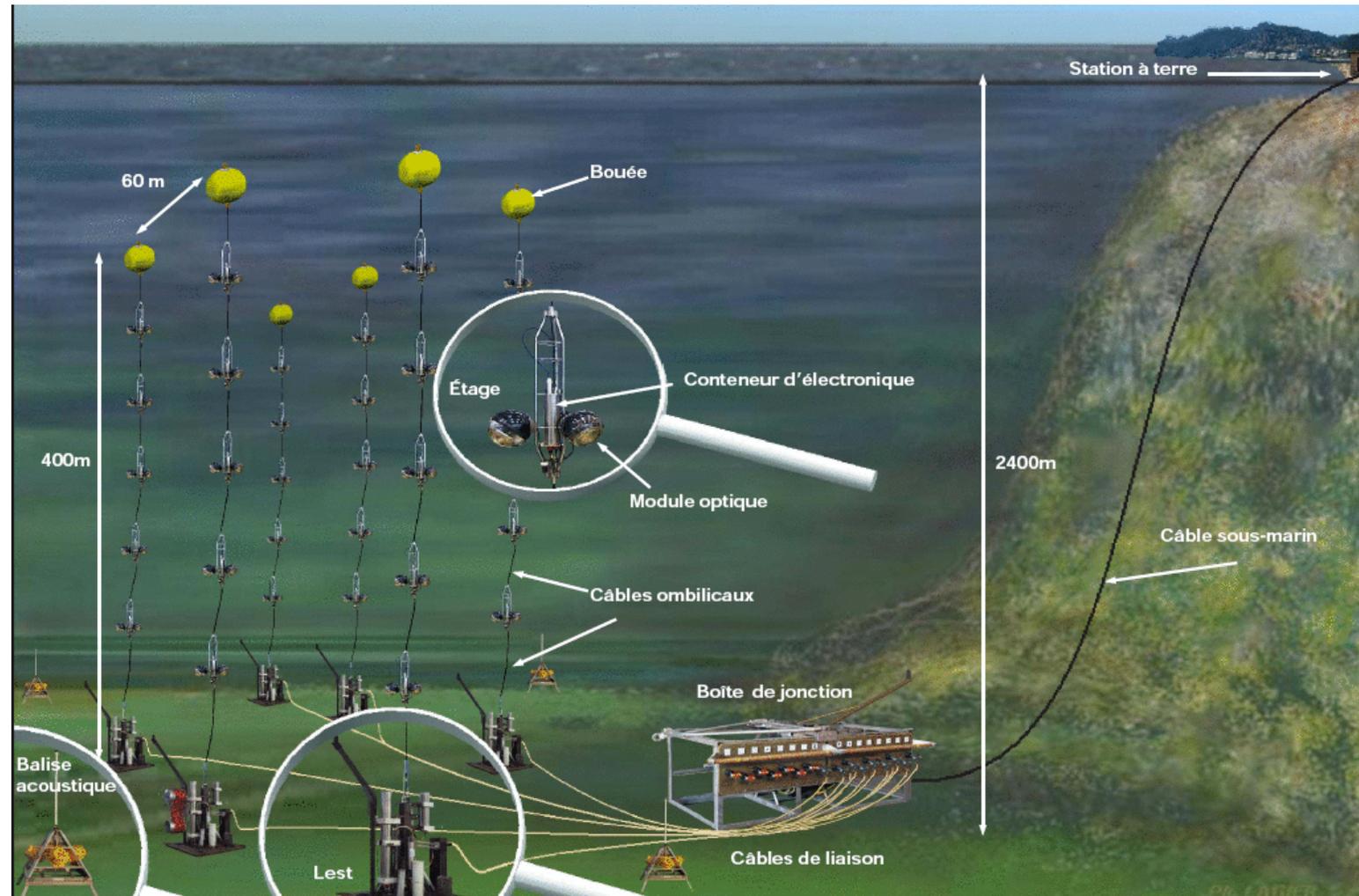
Les muons émettent un
rayonnement
Cherenkov (lumière)
dans l'eau de mer



Copyright Science& Vie Juillet 2007 Crédit Chantal Racca IReS

ANTARES :

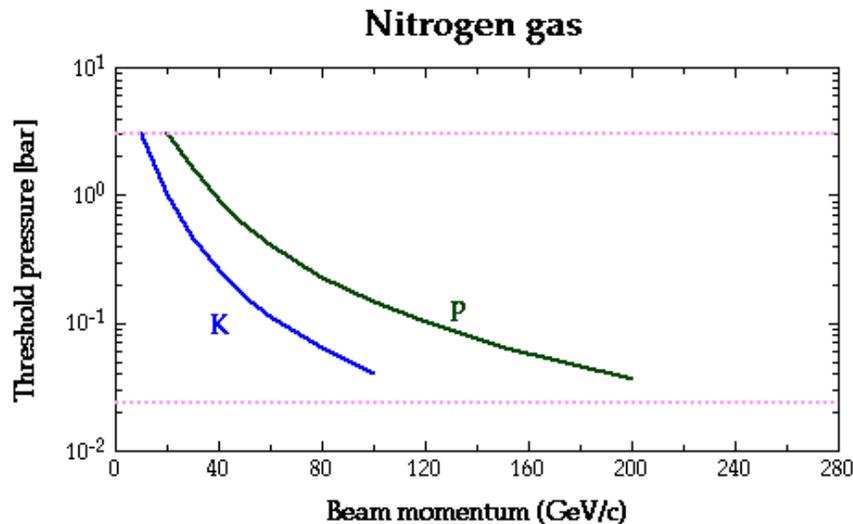
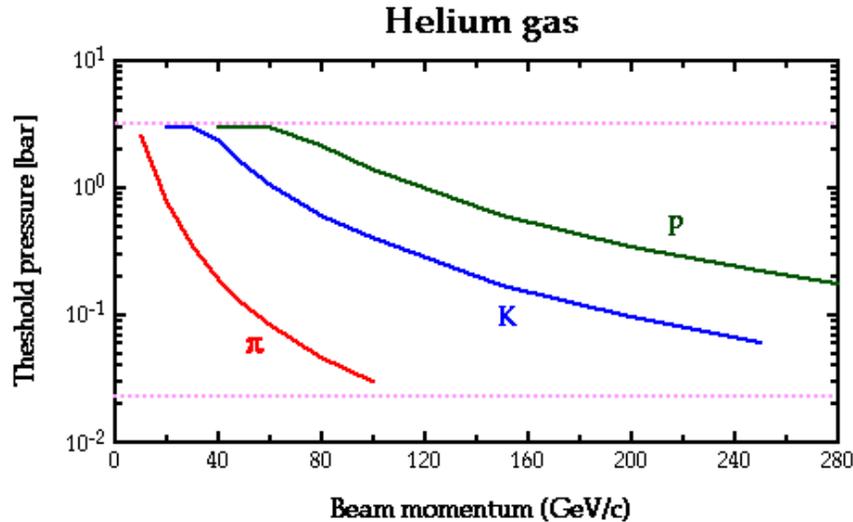
12 lignes de 25 étages à 3 PMs



Crédit Chantal Racca IReS

Č à seuil

L. Gatignon



$$\beta = v/c = p/E \sim 1 - M^2/(2p^2)$$

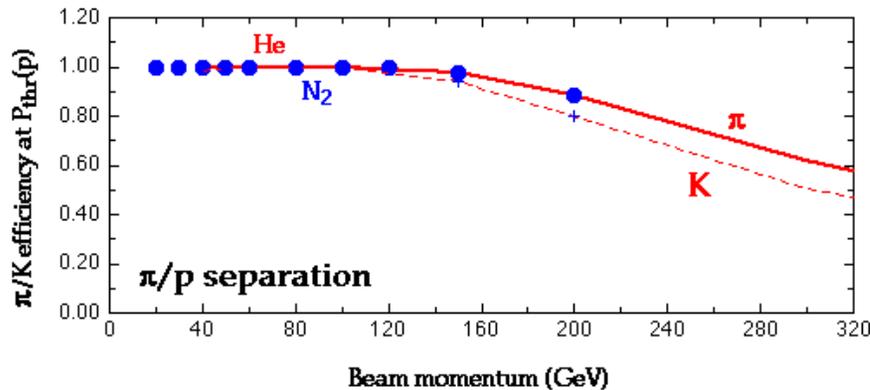
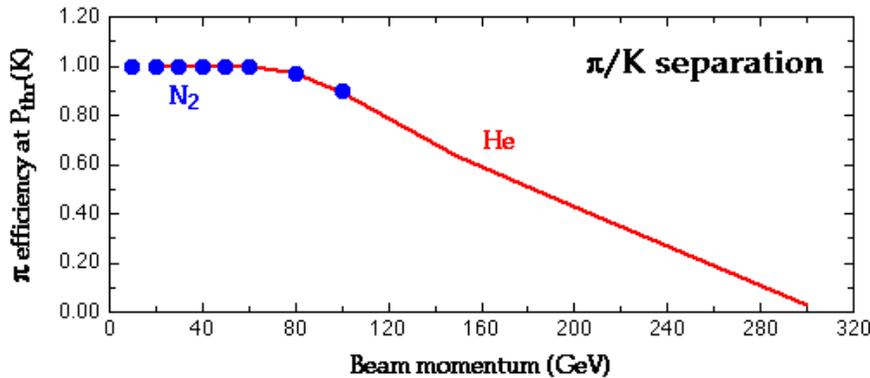
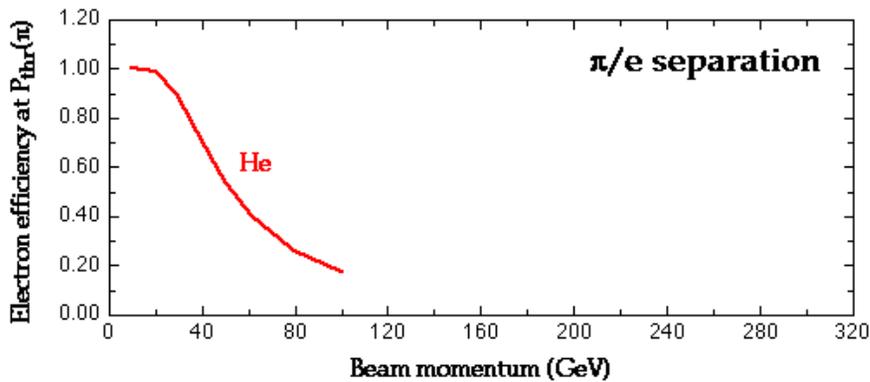
$$V=c/n, \quad p/E = c/n(P_{th}).$$

$$P_{th} = (1/2k) \times M^2/p^2$$

k= constante, dépend du gaz

$$k = 3.22 \cdot 10^{-5} \text{ pour l' Helium}$$

$$k = 2.99 \cdot 10^{-4} \text{ pour l' Azote}$$



Si $P > P_{th}$

Photoélectrons émis sous un angle \emptyset tel que

$$\emptyset^2 = 2kP - M^2/p^2$$

N photoélectrons émis sur une longueur L

en cm: $N = A L \emptyset^2$

Avec A cte efficacité quantique, optique, etc.

A typique ~ 100

$$N \sim 100 L (2kP - M^2/p^2)$$

Efficacité: $Eff = 1 - e^{-N}$

Efficacité théorique pour L = 10 m et A = 100

Particules Helium
 pi / e sep \rightarrow 50 GeV
 pi / K sep \rightarrow 180 GeV
 pi / p sep \rightarrow 250 GeV

Azote
 impossible
 sep \rightarrow 100 GeV
 sep \rightarrow 200 GeV

Applications Č à seuil

- Identification de particules sur faisceaux

Machines à cibles fixes

Exemple : faisceau de 10 Gev (PS du CERN) produit par des p primaires sur cible externe → faisceau secondaire, mélange de π , K, p

Faisceau séparé: électrostatique (trop haut en énergie) ou RF (trop cher...)

→ 4 Č de faisceau à seuil:

2 avec seuil entre π et K (ne “voient” que les π), Č1 et Č2 (hydrogène à 7.5 atm., L=3m)

2 avec seuil entre K et p (“voient” π et K), Č3 et Č4 (isobutane à 6,5 atm., L=2m)

$\pi = \check{C}1 \cdot \check{C}2 \cdot \check{C}3 \cdot \check{C}4$ $K = \underline{\check{C}1} \cdot \underline{\check{C}2} \cdot \check{C}3 \cdot \check{C}4$ et $p = \underline{\check{C}1} \cdot \underline{\check{C}2} \cdot \underline{\check{C}3} \cdot \underline{\check{C}4}$

3% de K^- et p^- bien identifiés. Impulsion P fixe! Inefficacité de chaque Č <1%

- Mesures des particules produites sur cible fixes (spectro multi particules état final) 1 (grand- multi PM) Č par seuil → bandes de sensibilité (p variable)

Č différentiel

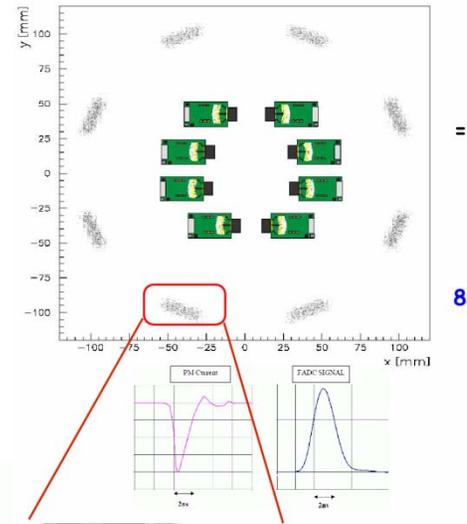
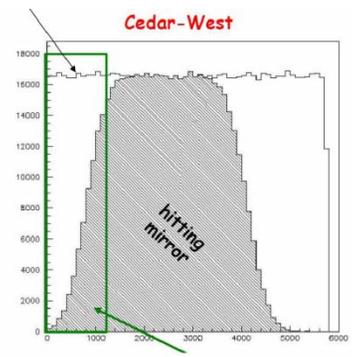
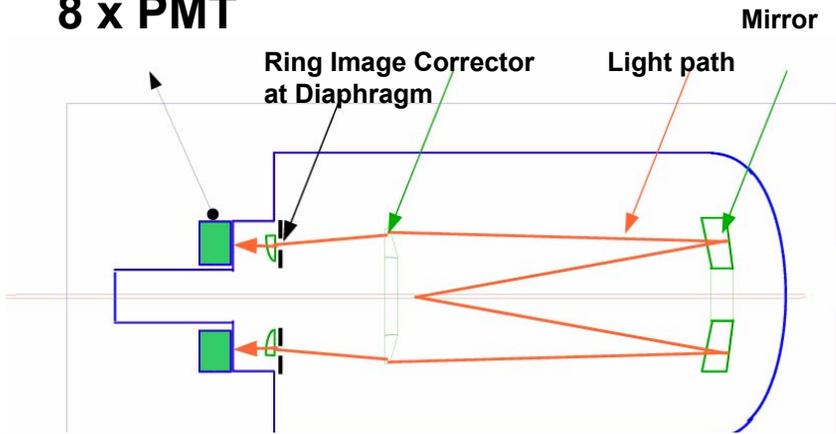
- 1970-1975 Č différentiel sur faisceaux hypérons (R. Meunier et al.)
- 1978 CEDAR (C. Bovet et al.) Rapport jaune CERN 82-13
 - K et π jusqu'à 300 (150) GeV/c
 - P 60 (12) GeV/c

Modifications proposées pour NA48 III. (L. Gatignon et al)

1 GHz total, 50 MHz/PM, 50 MHz de K-

PM multi anodes (32) → 3 MHz/canal + préamplis bas bruit rapide → FADC 1 GHz 8 bit

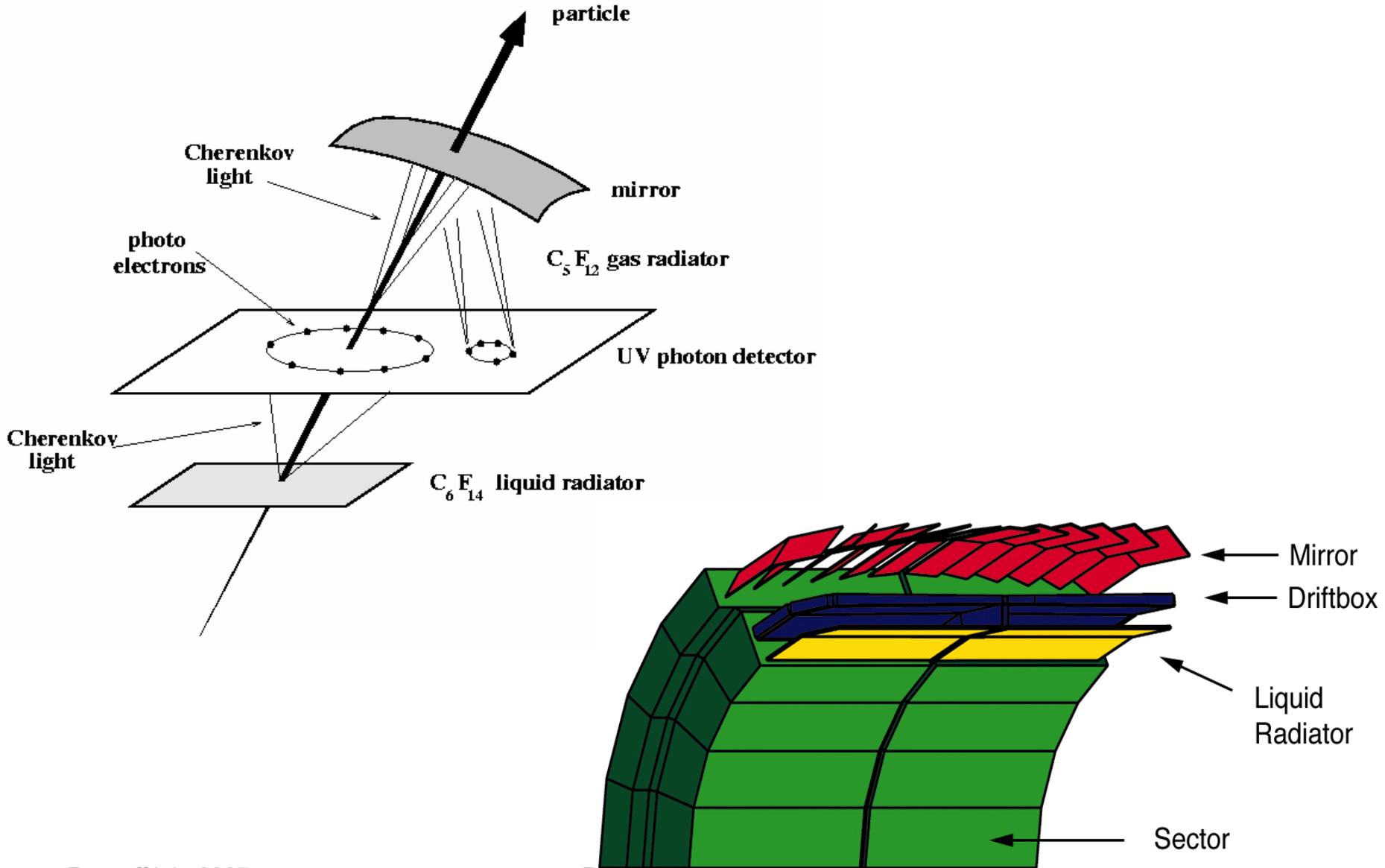
8 x PMT



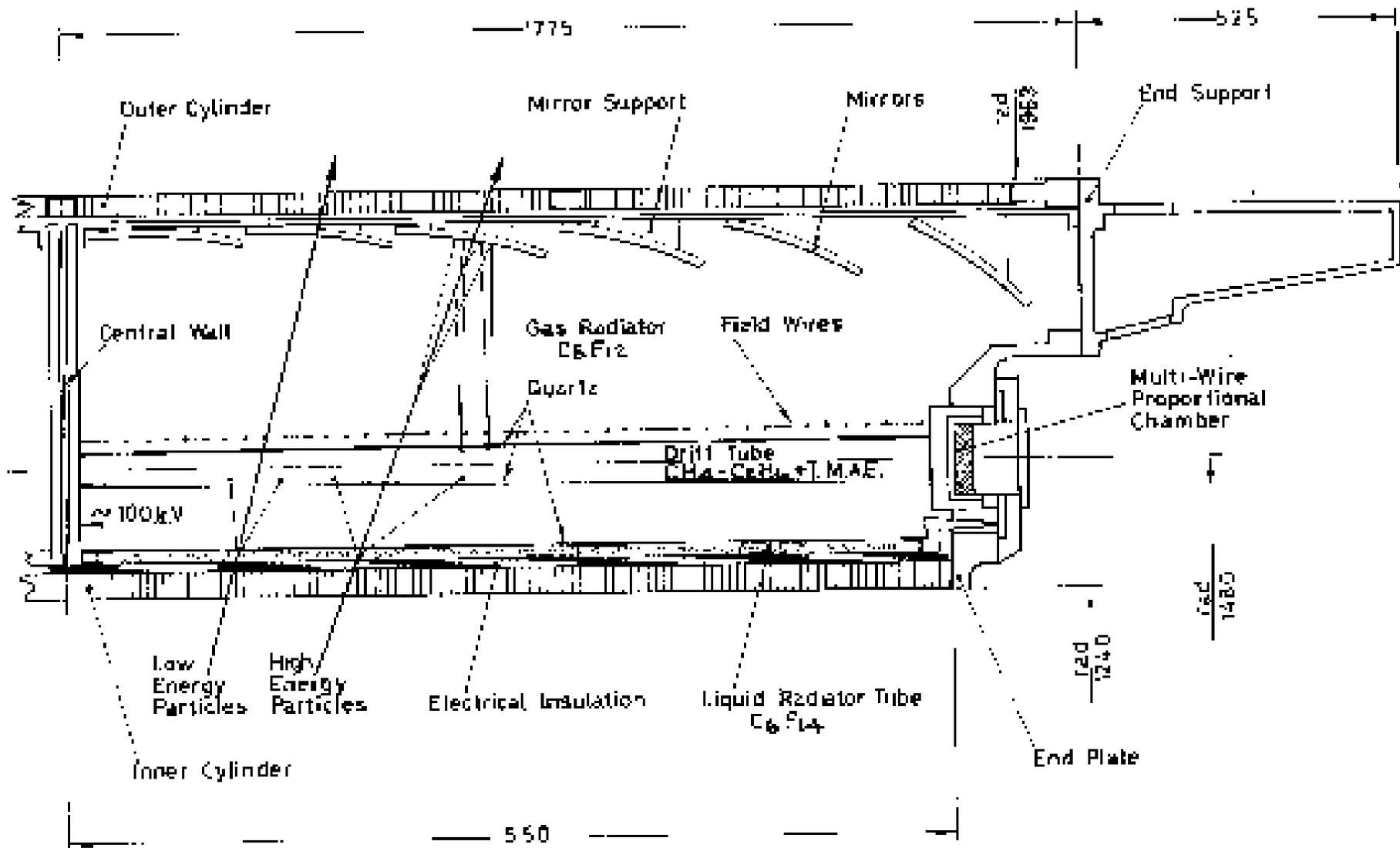
RICH

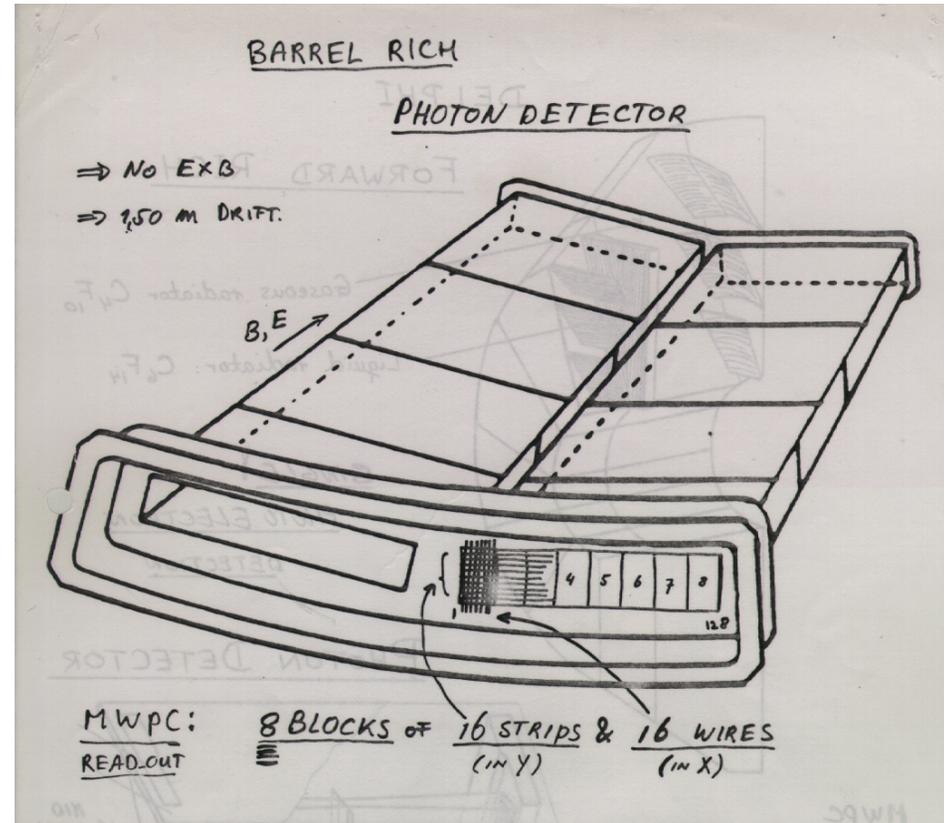
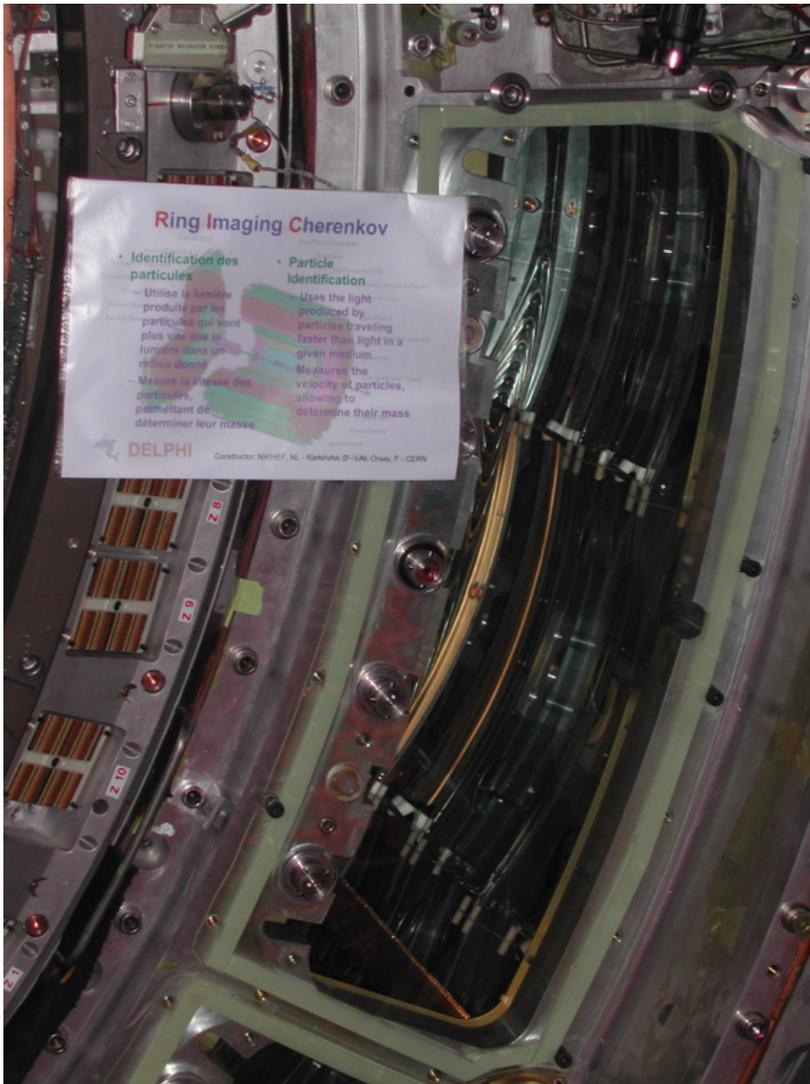
- Ring Imaging Cerenkov
- Propose par J Seguinot & T. Ypsilantis fin des années 70
- Construit dans Delphi à partir des années 80
- Exploite le principe du Cerenkov différentiel pour reconstruire des projections coniques
 - → anneaux de lumière
 - → anneaux d'électrons !

RICH Principe



DELPHI BRICH





Quelques détails...

Le radiateur liquide du Barrel RICH

- Le radiateur liquide est rempli avec du perfluorhexane liquide (C₆F₁₄)
- La boîte du radiateur est faite en quartz transparent
 - Une trace dans le radiateur liquide donne en moyenne 12 photoélectrons
- Le problème : ils sont supposés dériver sur 152 cm...

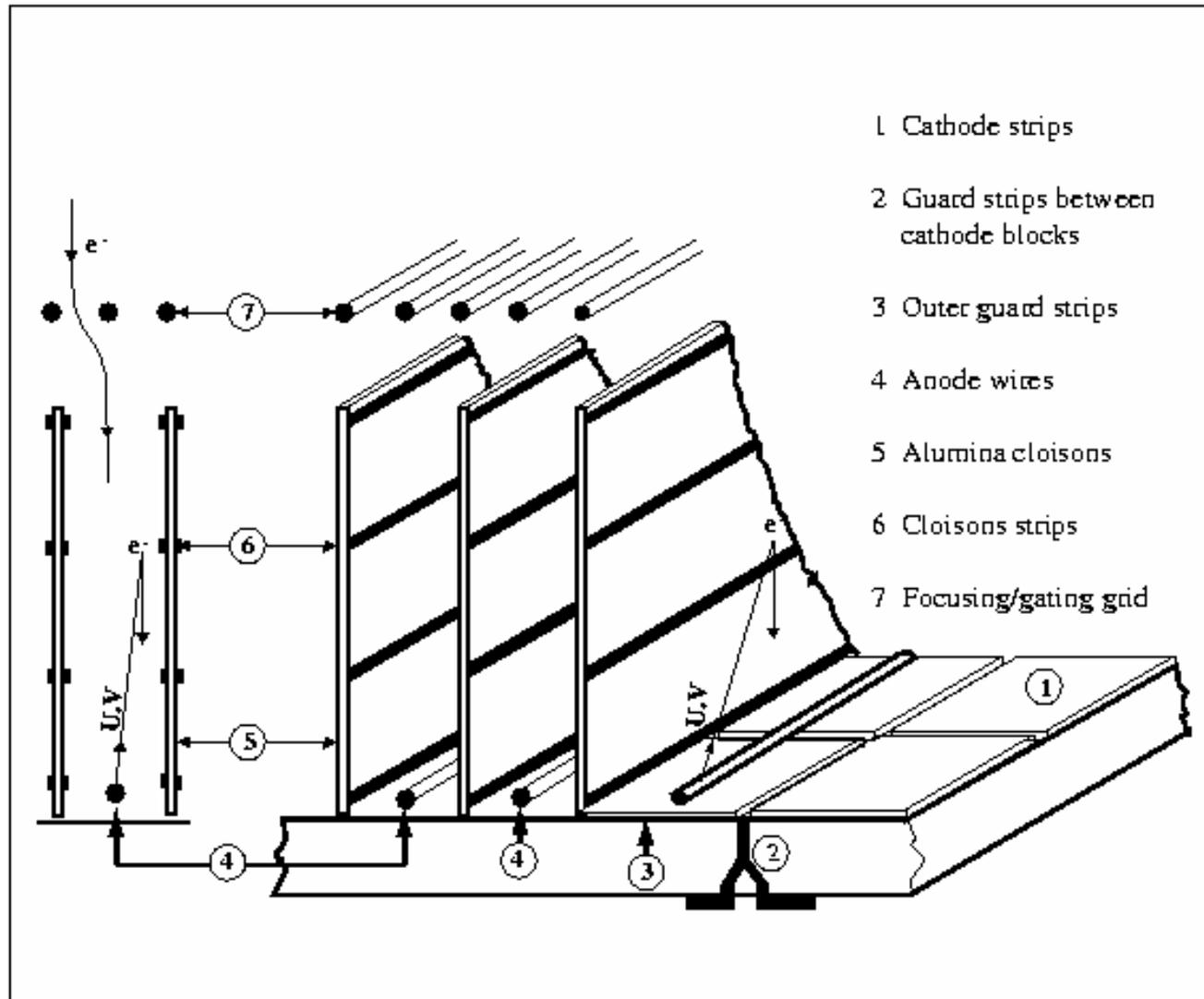
Le détecteur de photons du Barrel RICH

- Le gaz de dérive est un mélange de 80% Argon (Ar) et 20% Méthane (CH₄) avec un petit pourcentage de TMAE (0.1%)
 - Les photoélectrons dérivent à une vitesse de 4.5 cm/microseconde.
 - THT : 54 000 V. 500 résistances de 3 MOhm chacune.

Les Chambres Proportionnelles Multifils du Barrel RICH

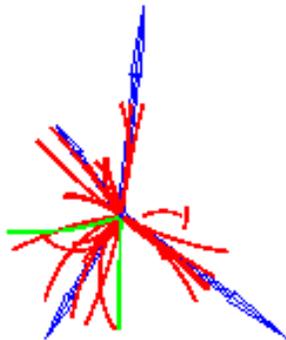
- 128 fil d'anode par chambre, total de 48 chambres, 8*16 strips par chambre
 - Distance entre fils d'anode 2.62 mm. Diamètre du fil 20 micron.
 - Multiplicité moyenne de l'avalanche d'électrons induite par 1 photoélectron = 10**5

Chambre Proportionnelle BRICH

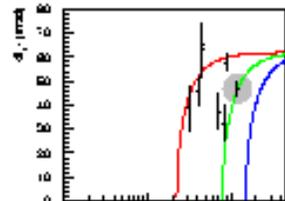


Paramètres Delphi B-RICH

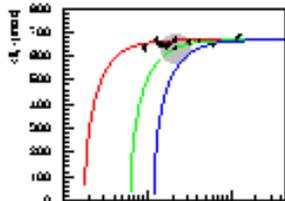
- Longueur Détecteur = 2×154 cm ($z > 0, z < 0$), 500 3M Ω Chaîne de Résistances, VHV = 54 000 V.
- Radiateur Liquide Indice : $n = 1.2718$, Radiateur Gaz Indice : $n = 1.00198$
- 288 Miroirs au total, 24 m³ de Radiateur Gaz,
- 48 Radiateurs Liquides(C₆F₁₄) (240 l)
- 48 Détecteurs Photon-UV (1200 l), 80% Argon, 20% Méthane , 0.15 % TMAE
- 12288 Canaux électroniques
- Température = 40 degrés, 1030 nP
- Contrôle SIEMENS de tous les sous-systèmes
- Température TMAE = 28 degrés



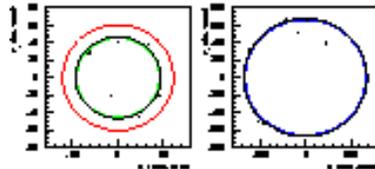
4 Jet Event



Kaon Gas Radiator

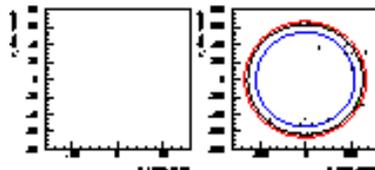


Kaon Liquid Radiator



Kaon 11.8 GeV/c

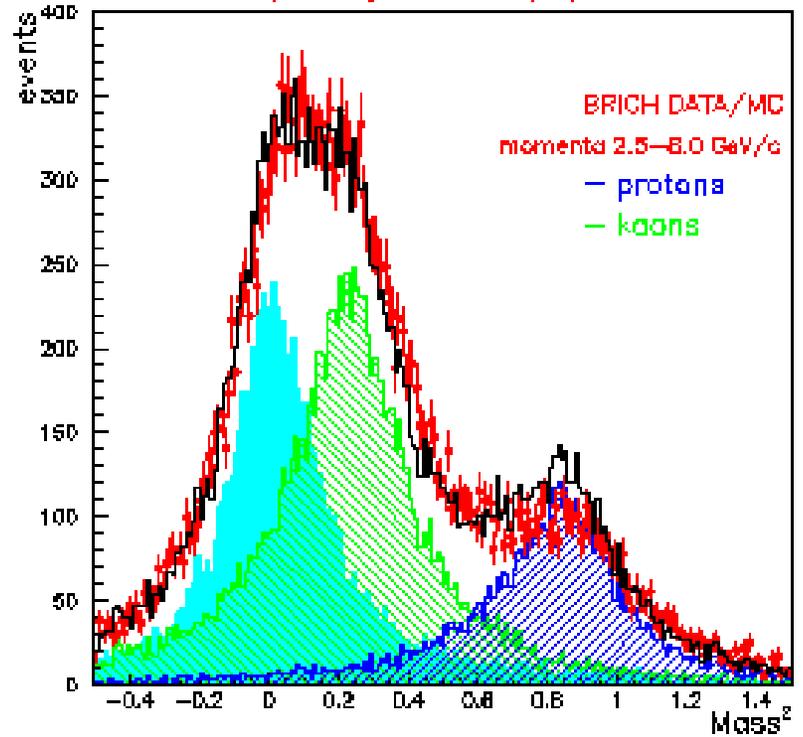
Gas Radiator: Ring identification
Liquid Radiator: Ambiguous

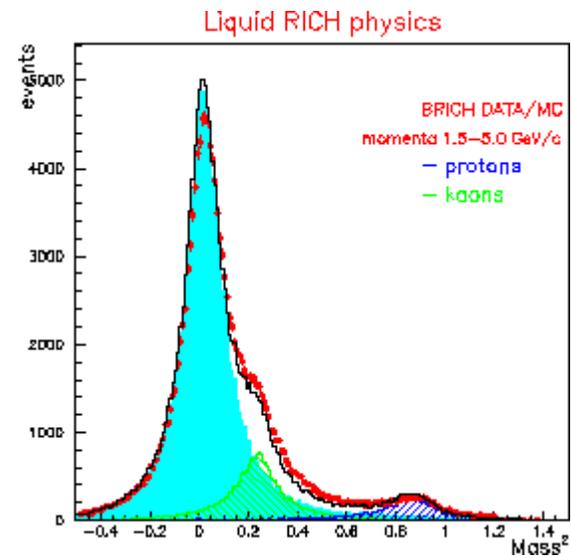
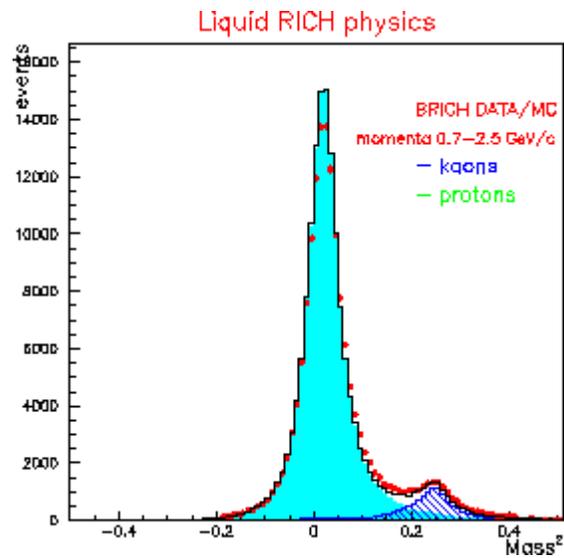
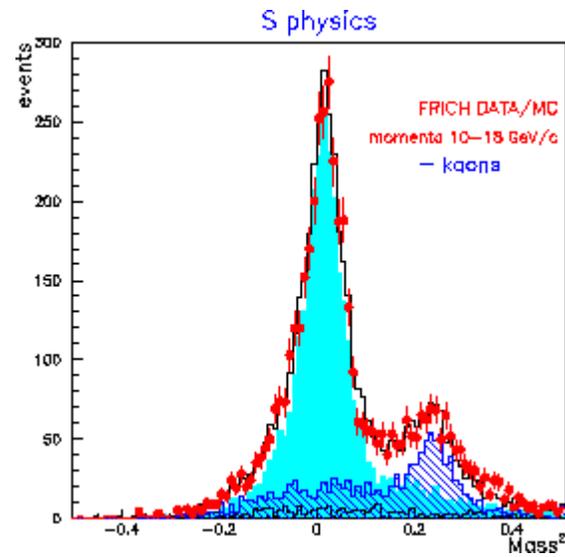
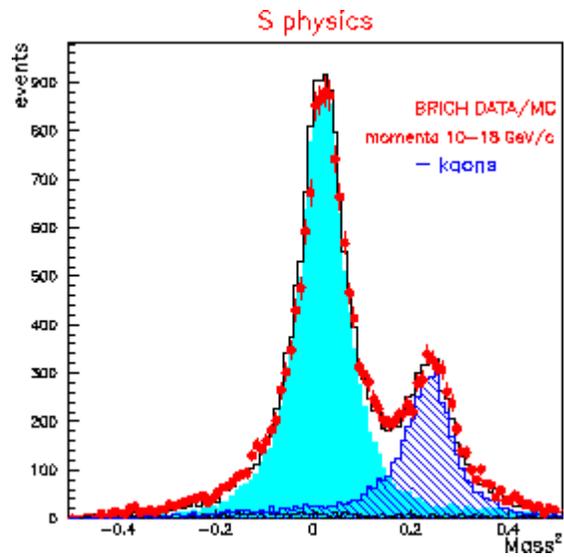


Kaon 2.2 GeV/c

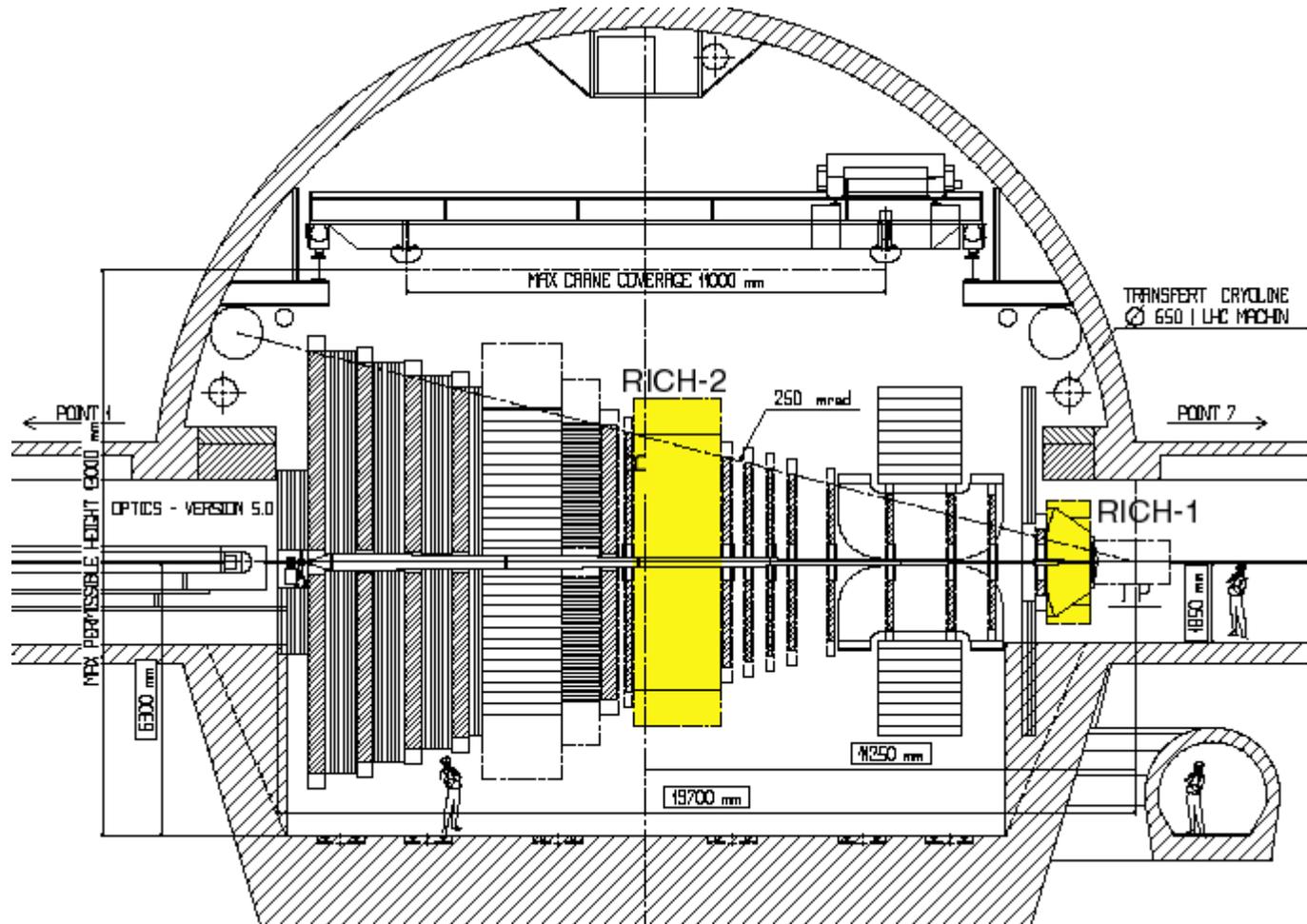
Gas Radiator: Velocity identification
Liquid Radiator: Ring identification

Liquid-gas RICH physics





RICH à LHCb



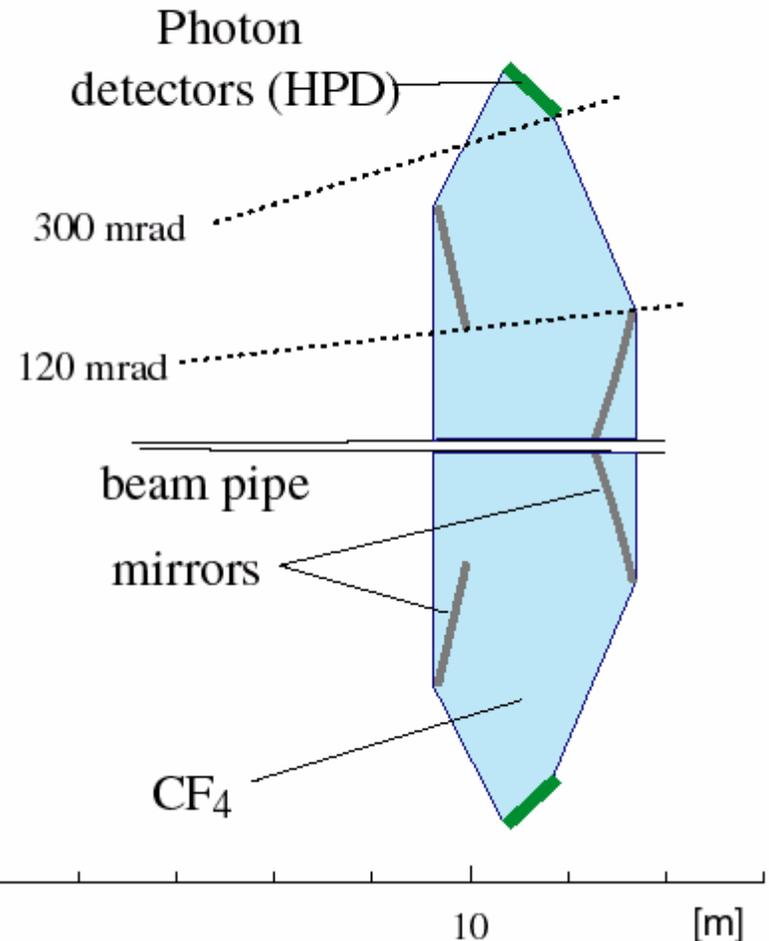
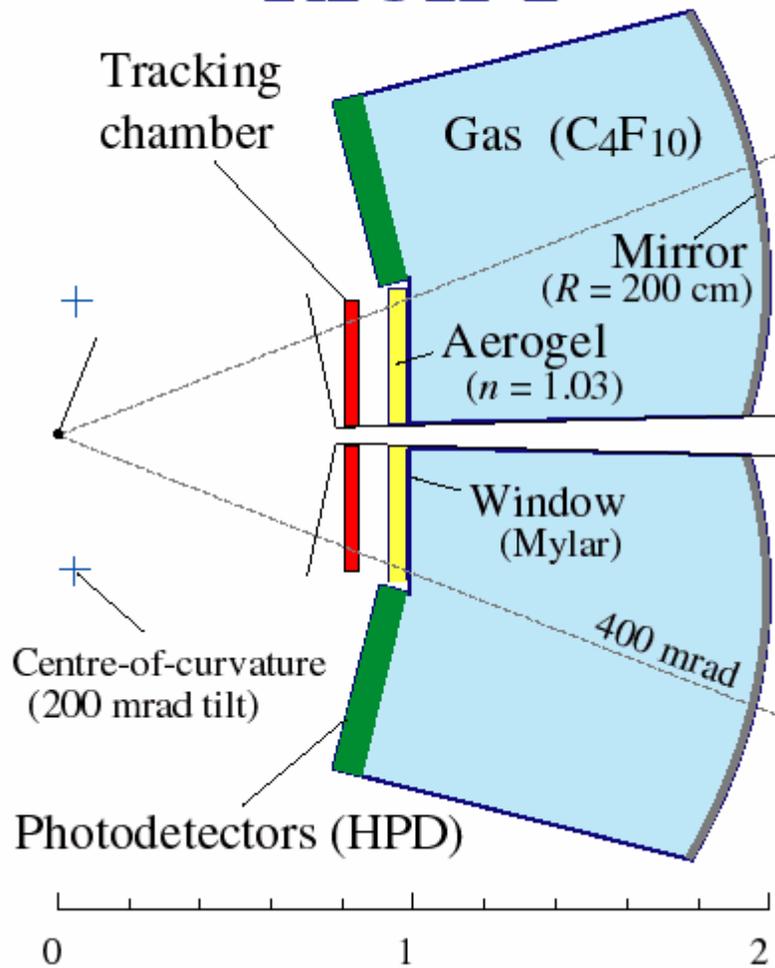
Gamme p 1 - 150 Gev

10 – 30 mrad

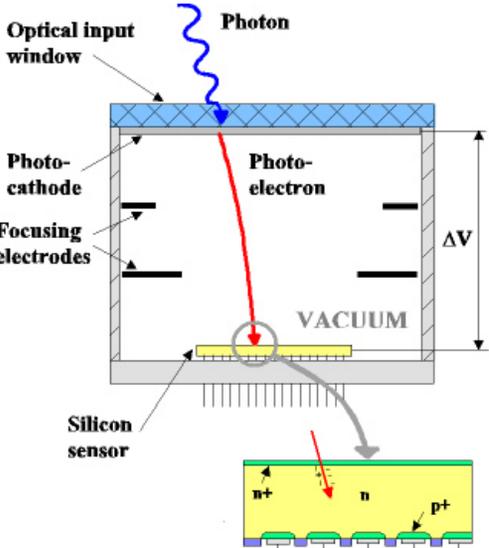
RICH-1

Top View

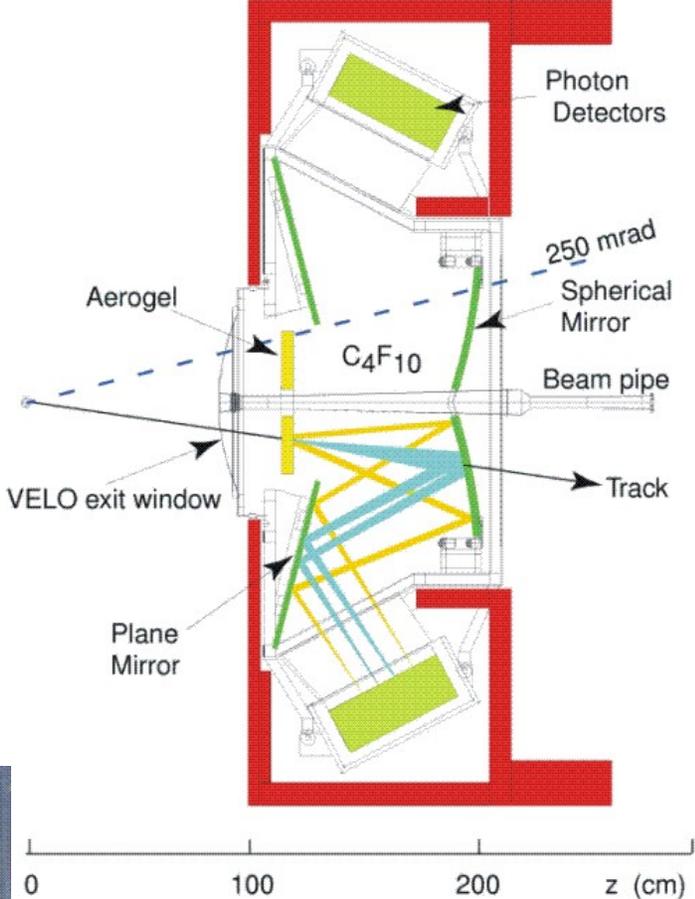
RICH-2

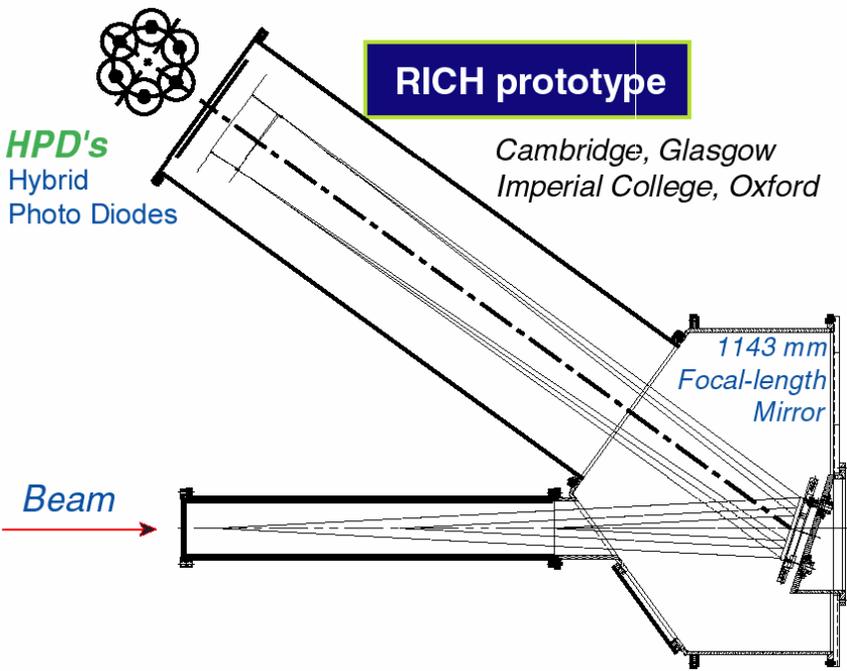


LHCb RICH 1



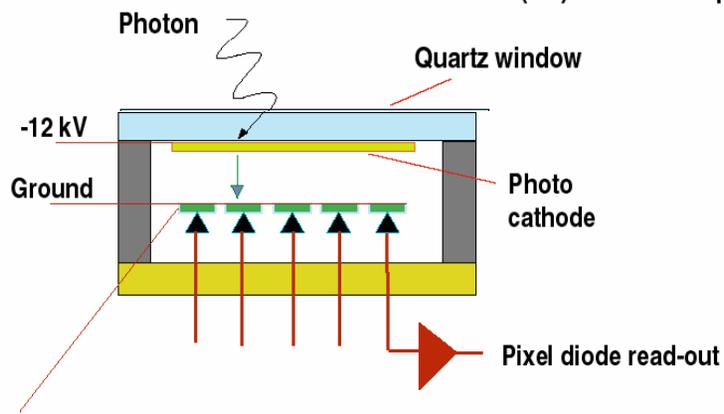
The photodetector planes will cover a total area of 2.6m^2 with a granularity of about $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$.





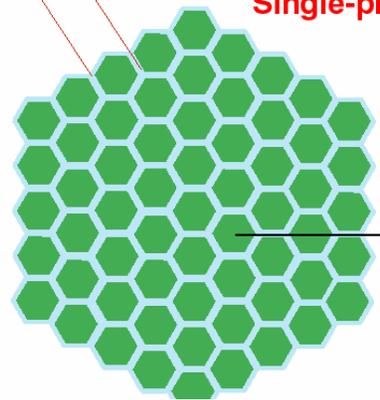
Hybrid Photo Diode:

61-pixel diodes : 2 x 2 mm²
DEP (NL) + UK development

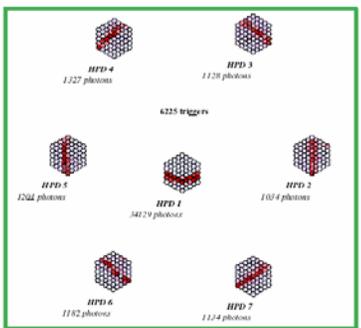
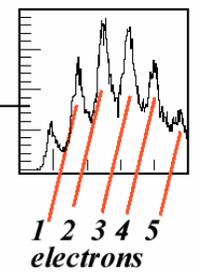


silicon
one pixel 2mm

Single-photon sensitivity



Spectra taken with pulsed weak light (green) source



Display of the hits in a run taken with a pion beam, showing the rings from aerogel and C₄F₁₀ radiators.

