

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2025-2026

Première partie - L. Favart

VI - Détection des particules

Contenu Chapitre VI

VI. Détection des particules

1. Schéma général des détecteurs aux collisionneurs
2. Identification des particules
3. Techniques de détection
 - 3.a Détecteurs à volume gazeux
 - 3.b Détecteurs à semi-conducteurs
 - 3.c Calorimètres
 - 3.d Détecteurs de muons
4. Expériences à cible fixe
5. Imagerie Cherenkov

Introduction

Détection: directe/indirecte

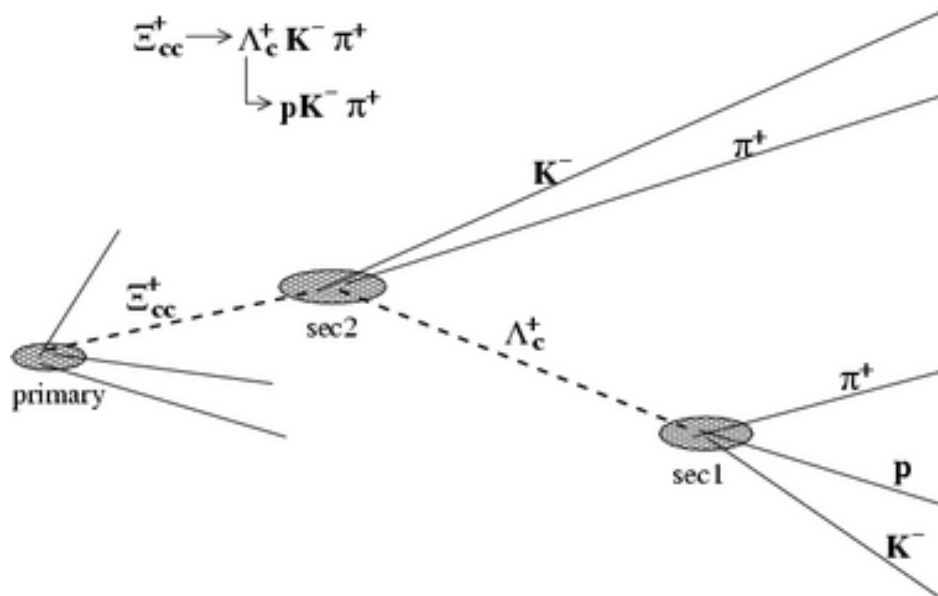
- directe : reconstruction et identification dans le détecteur ($e^{+/-}$, μ , γ , $\pi^{+/-}$, $K^{+/-}$, p, ions)
- indirecte : reconstruction grâce aux particules issues de la désintégration

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \quad \Lambda \rightarrow p \pi^-$$

si temps de vie tel que la distance parcourue dans le détecteur est > 0.5 cm

→ reconstruction d'un **vertex secondaire**

$$L = \beta \gamma c \tau = \frac{p}{m} c \tau$$



Distinguer vertex primaire et secondaire
exige de faire appel à un détecteur de
vertex offrant une résolution spatiale de
 $\sim 10 \mu\text{m}$, situé tout près de la région
d'interaction.

Temps de vie des particules et reconstruction d'un vertex secondaire

	$c\tau$	quarks
μ	659m	
τ	87 μm	
$\pi^\pm$	7.8m	$\bar{u}d/\bar{d}u$
π^0	25nm	$\bar{u}u/\bar{d}d$
$K^\pm$	3.7m	$\bar{s}u/s\bar{u}$
K_S^0	2.7cm	$\bar{s}d/s\bar{d}$
K_L^0	15.5m	$\bar{s}d/s\bar{d}$
Λ^0	7.9cm	uds
$\Sigma^\pm$	2.4cm	uus/dds

	$c\tau$	quarks
$D^\pm$	315 μm	$\bar{c}d/c\bar{d}$
D^0	123 μm	$\bar{c}u/c\bar{u}$
$D_s^\pm$	147 μm	$\bar{c}s/c\bar{s}$
$B^\pm$	502 μm	$\bar{b}u/b\bar{u}$
B^0	462 μm	$\bar{b}d/b\bar{d}$
B_s^0	438 μm	$\bar{b}s/b\bar{s}$
Λ_c^+	60 μm	udc
Λ_b^0	368 μm	udb

traverse sans désintégration

vtx sec. rec. si très bonne résolution

vtx secondaire éloigné

non discernable du vtx primaire

Mesure directe de la masse ?

Si mesure de p (détecteur de traces) et de E (calorimètre) $\Rightarrow$ masse ?

$$m^2 = E^2 - p^2 \quad \Rightarrow \quad (\Delta m)^2 = \left(\frac{E\Delta E}{m}\right)^2 + \left(\frac{p\Delta p}{m}\right)^2$$

prenons un cas favorable mais réaliste:

$$|\vec{p}| = 3 \text{ GeV}, \Delta p/p = 1\% \text{ et } \Delta E/E = 5 \%$$

$$\Rightarrow \Delta m = 0.5 \text{ GeV}$$

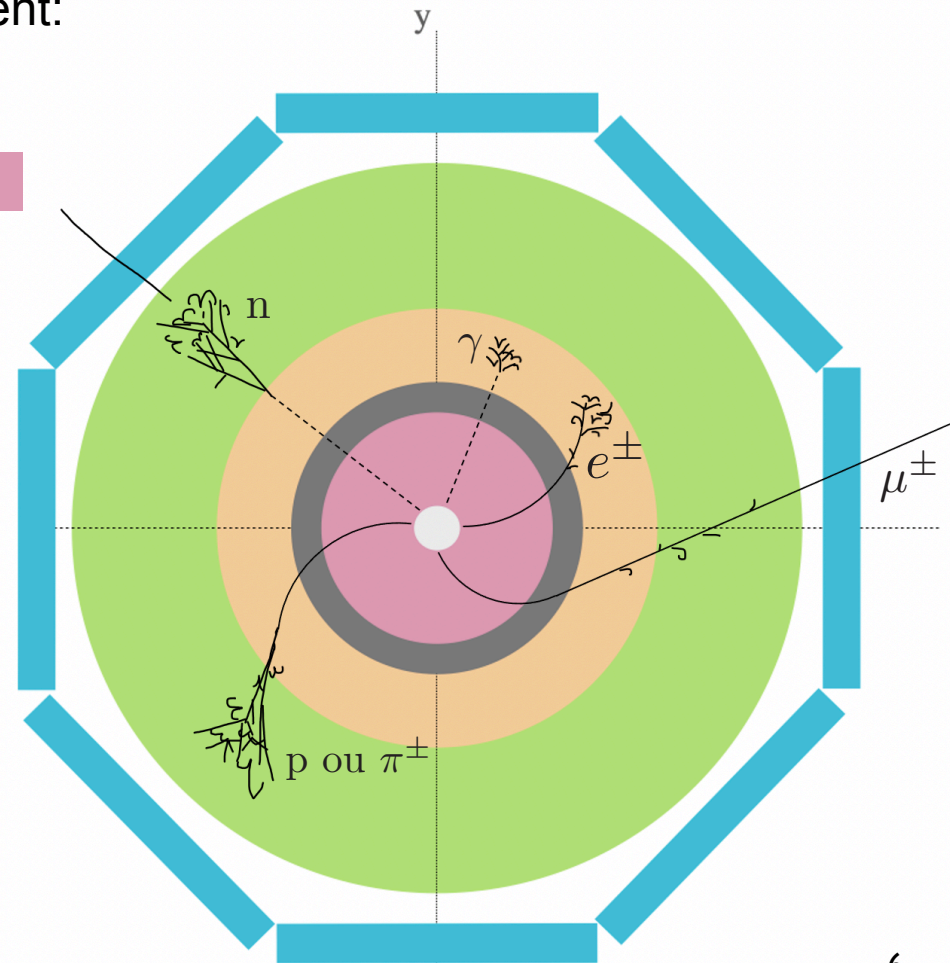
qui ne permet pas de distinguer un p (0.938 GeV) d'un K (0.494 GeV) ou d'un π (0.140 GeV)

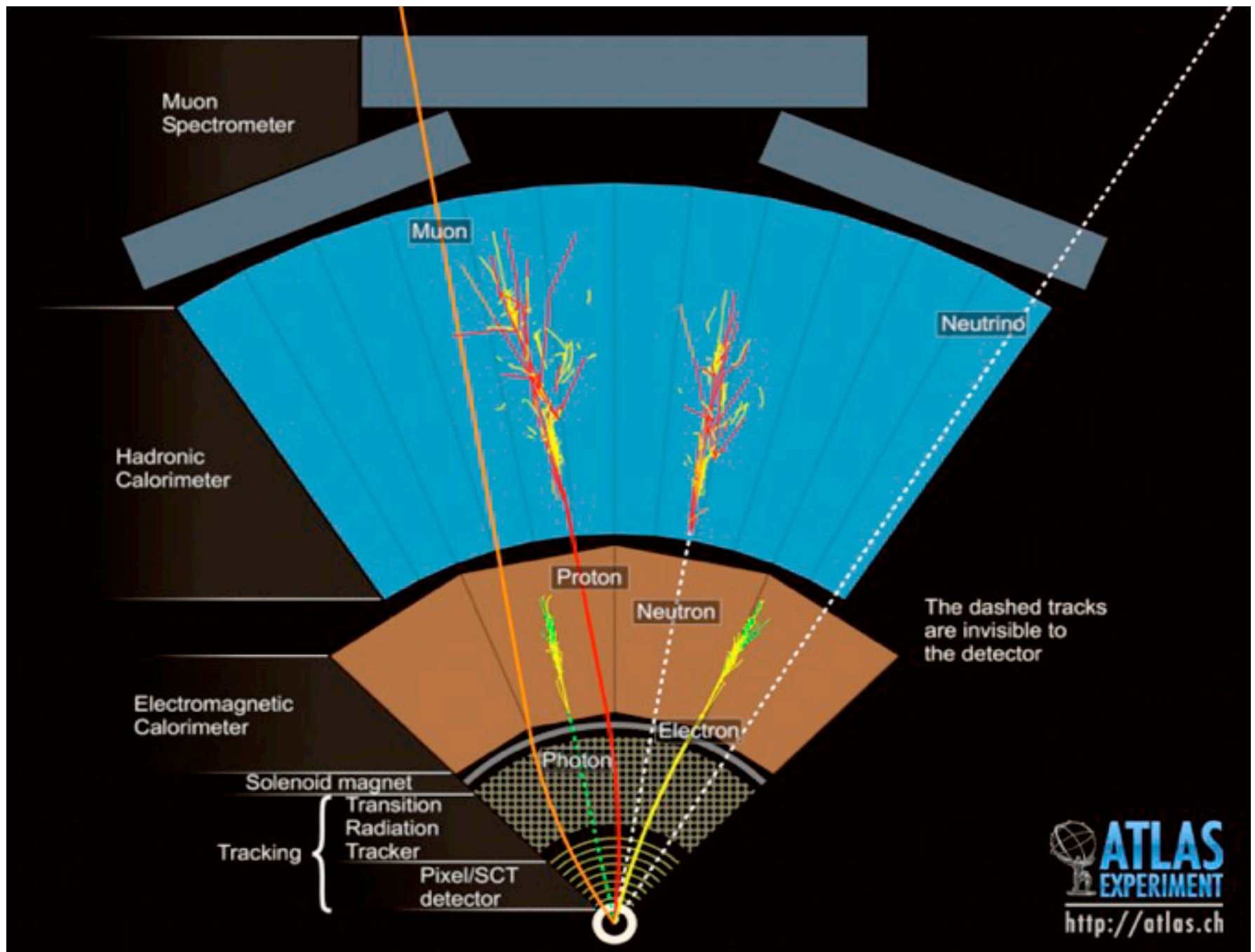
$\Rightarrow$ besoin d'autres méthodes (temps de vol, effect Cherenkov, $dE/dx, \dots$)

Schéma général des détecteurs aux collisionneurs

Les détecteurs aux collisionneurs sont constitués de différentes couches de détection cylindriques concentriques, que les particules émises sont susceptibles de traverser successivement:

- les détecteurs de traces et de vertex ■
- le solénoïde ■
- le calorimètre électromagnétique ■
- le calorimètre hadronique ■
- le détecteur de muons ■

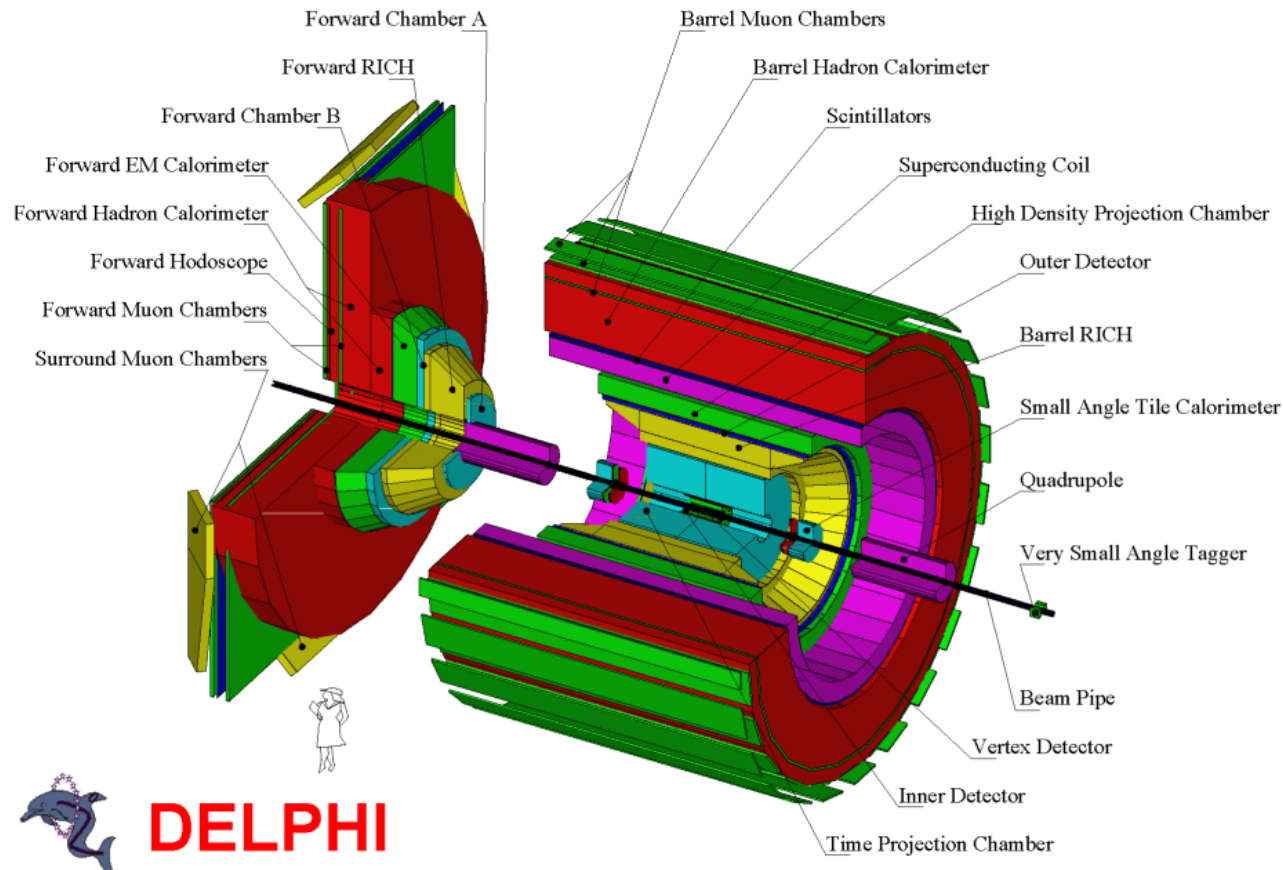




Pour détecter aussi les particules émises vers l'avant et vers l'arrière, on complète la partie cylindrique par deux bouchons (un seul dessiné):

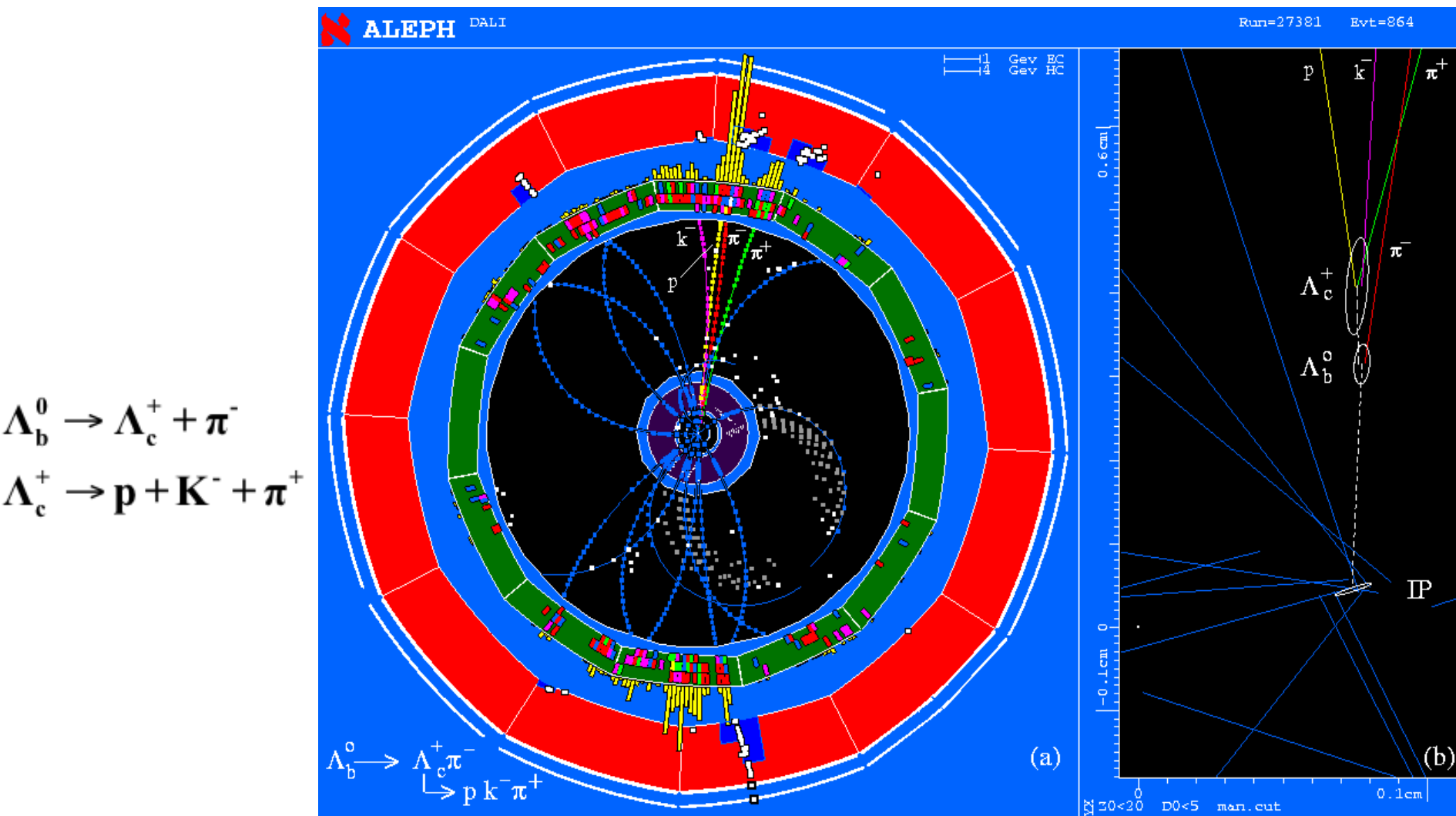
bouchons
ou
« endcaps »
ou
« forward detectors »

reconstruction approchée
d'un éventuel neutrino
par bilan d'impulsion
dans les directions
transverses



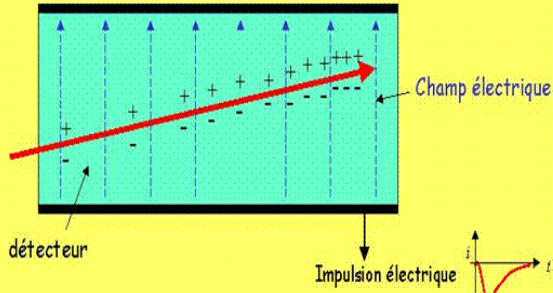
Identification par vertex secondaire

- Observation de particules charmées et porteuses de beauté dans le détecteur ALEPH, au LEP. Ces particules sont identifiées en reconstruisant leur masse invariante.

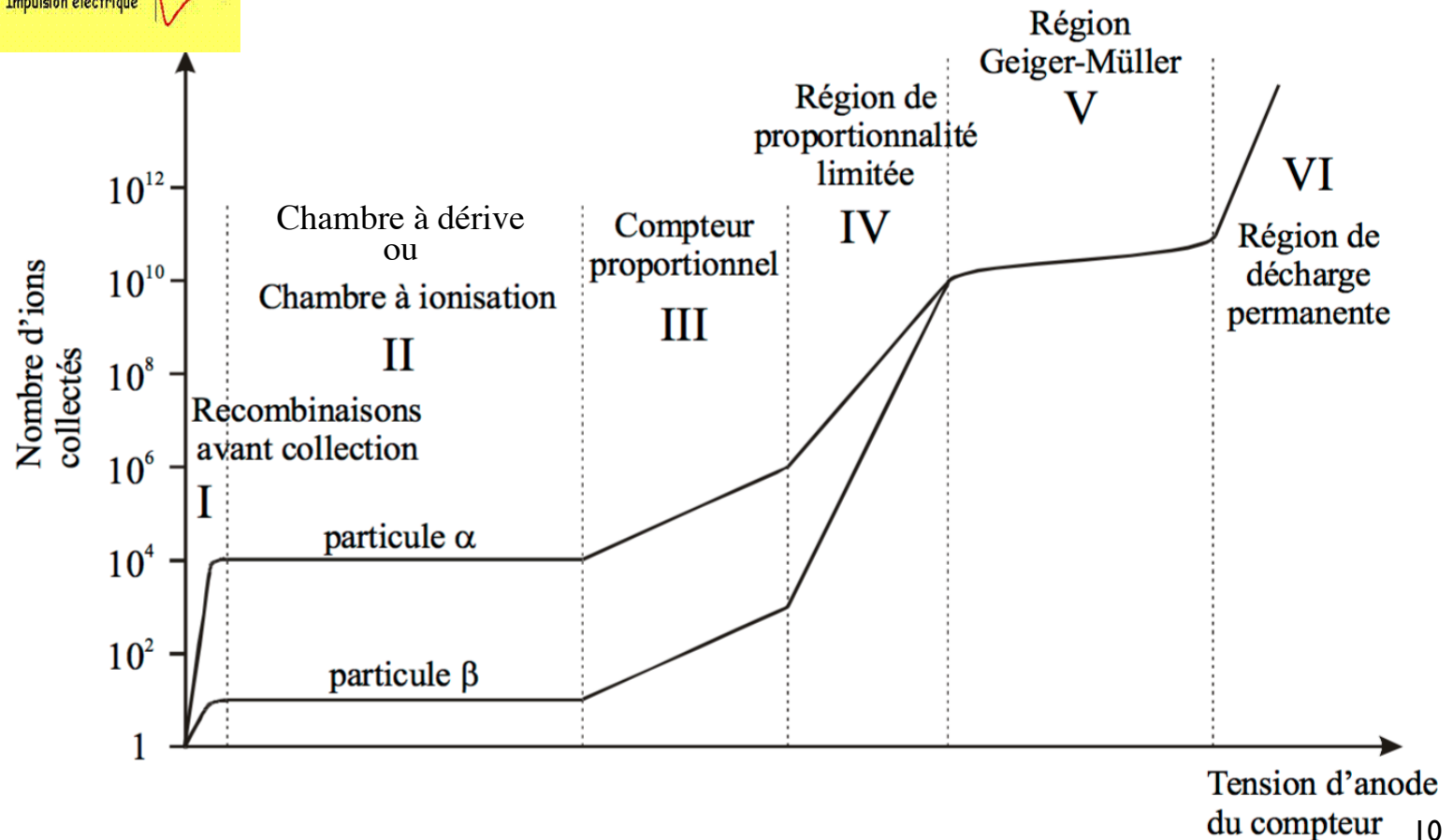


3.a Détecteur à volume sensible gazeux

ionisation des atomes : extraction d'un électron

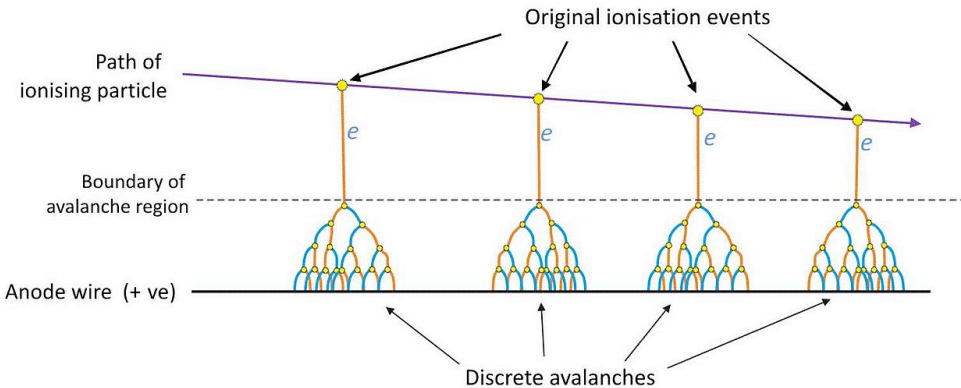


différents régimes en fonction de la différence de potentiel appliquée



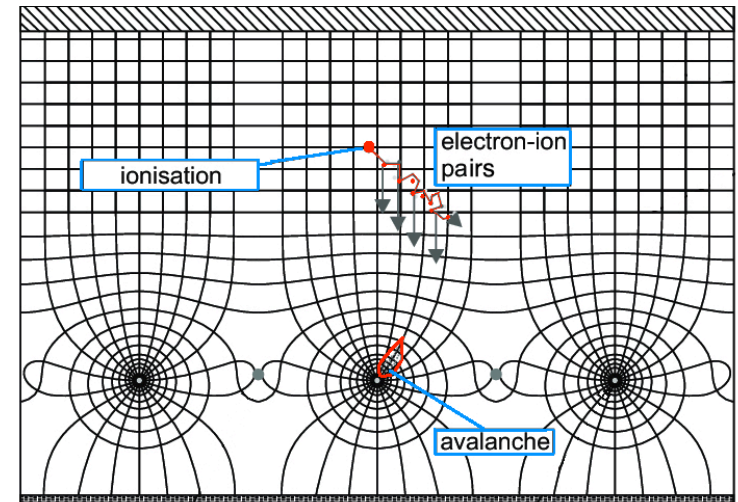
Différents régimes

Creation of discrete avalanches in a proportional counter



vue longitudinale

vue transverse - lignes du champ E



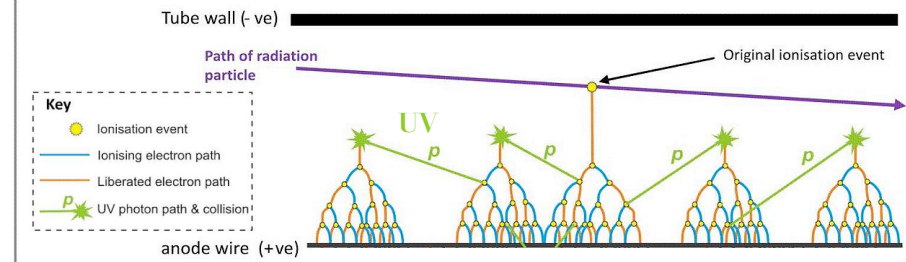
$$E \sim 1/r$$

→ Avalanche près de l'anode

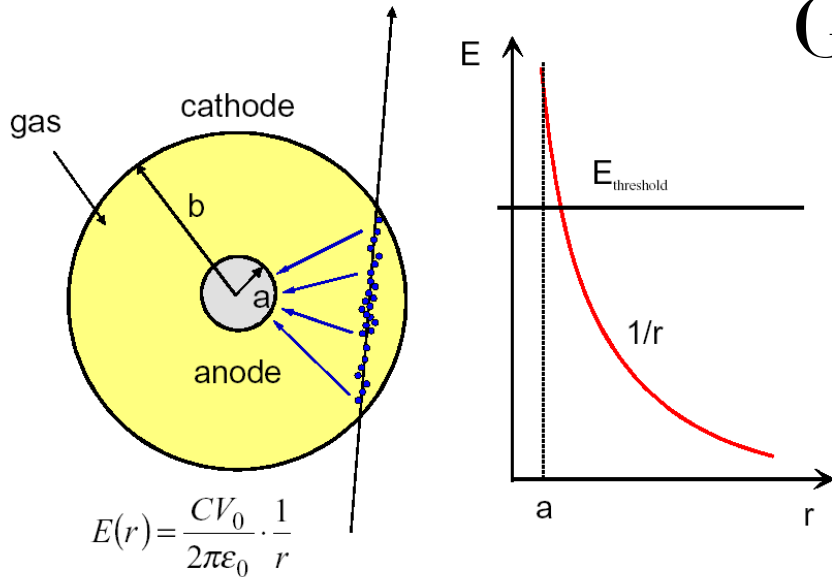


→ signal mesurable

Spread of avalanches in a Geiger-Muller tube



Géométries des électrodes



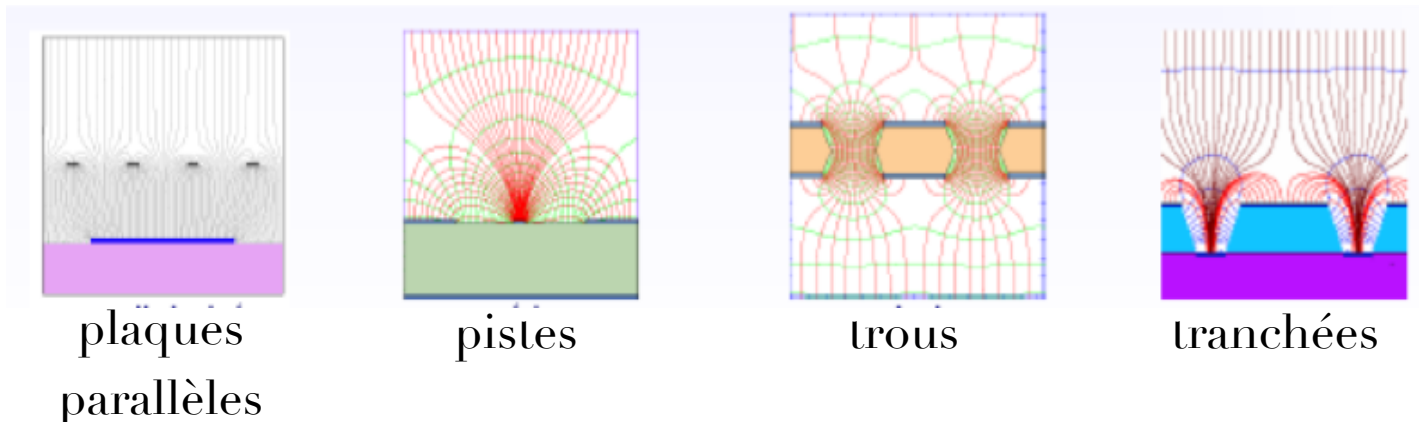
$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

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

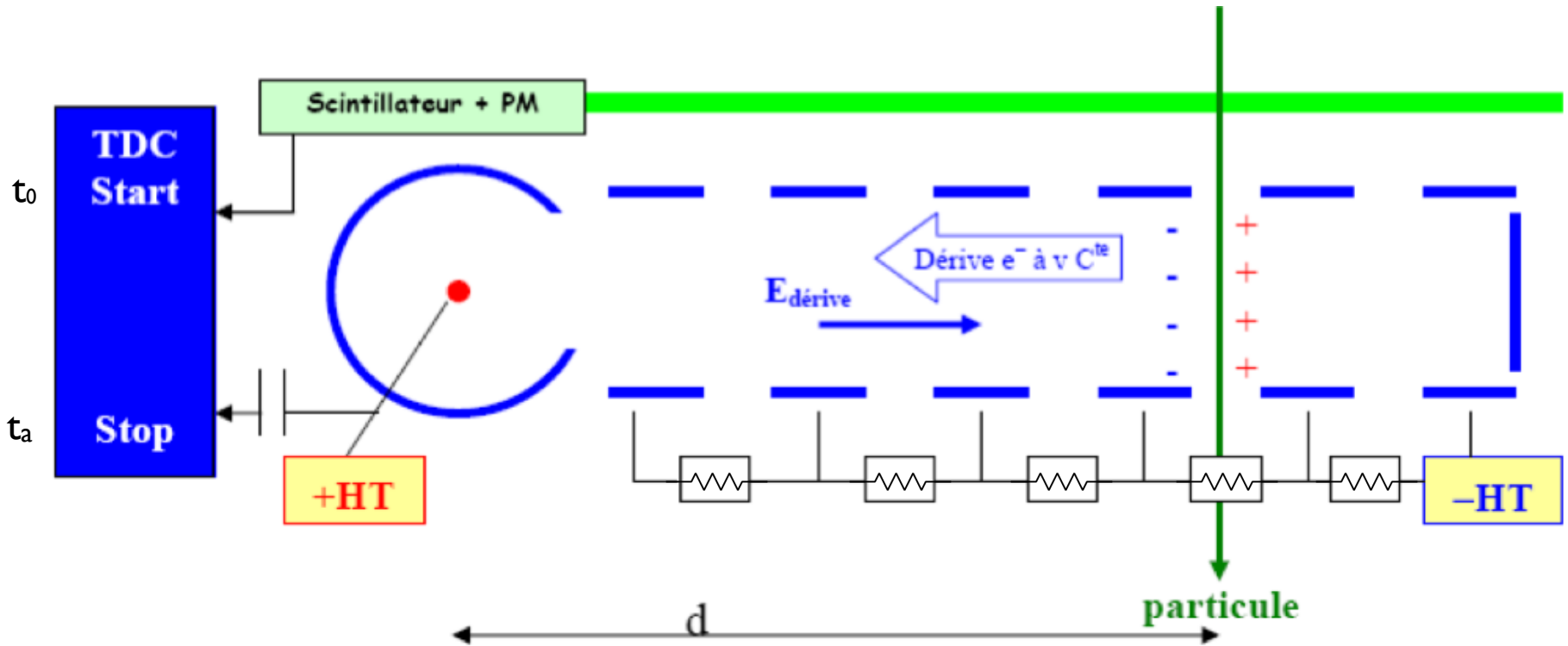
C = capacitance / unit length

Typiquement :
 $b=10 \text{ mm}$, $a=10 \text{ }\mu\text{m}$

La résolution spéciale dépend de l'espacement entre les électrodes et
 l'intensité du champ de leur géométrie

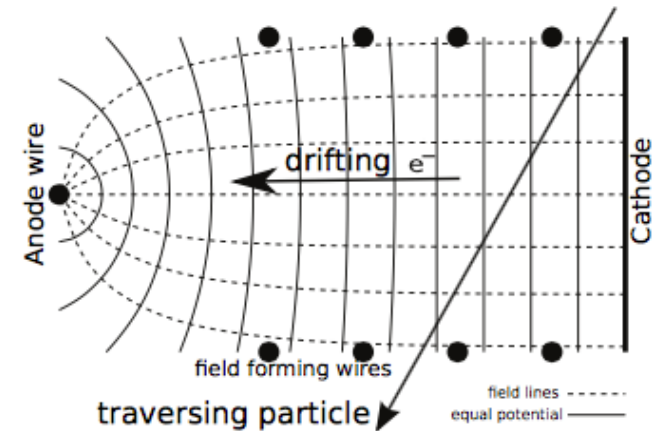


La chambre à dérive



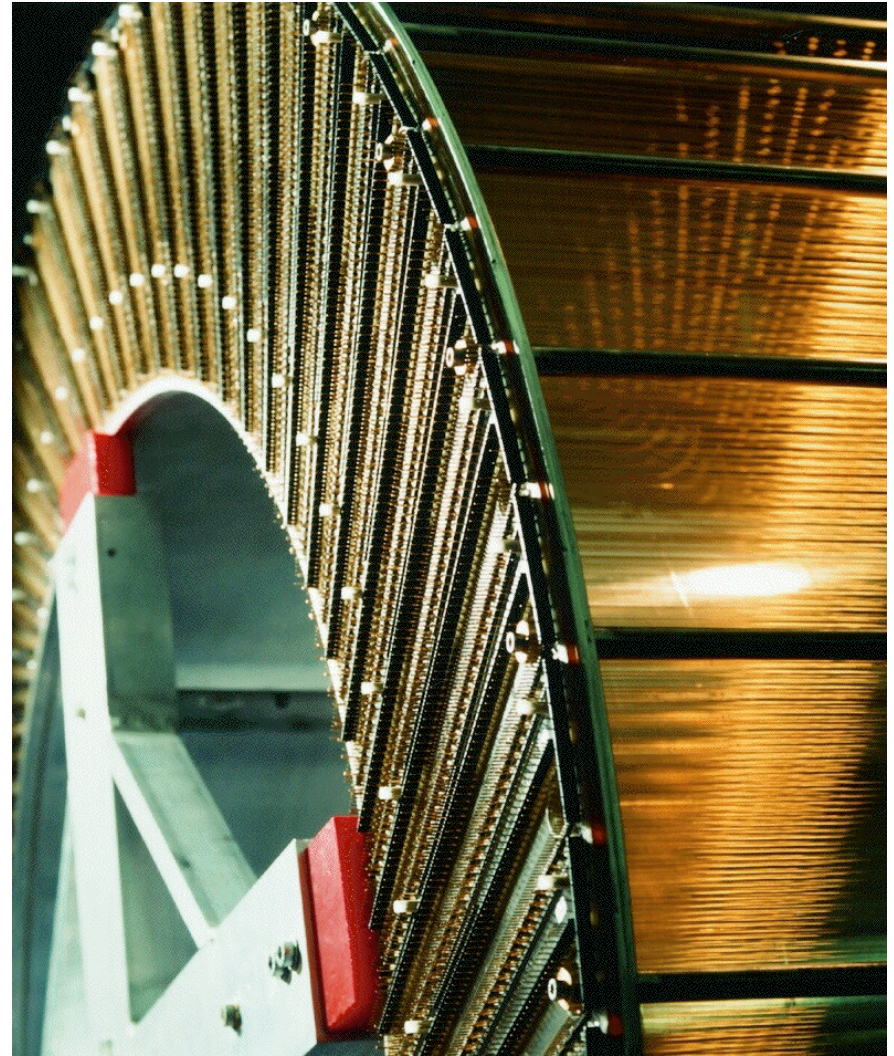
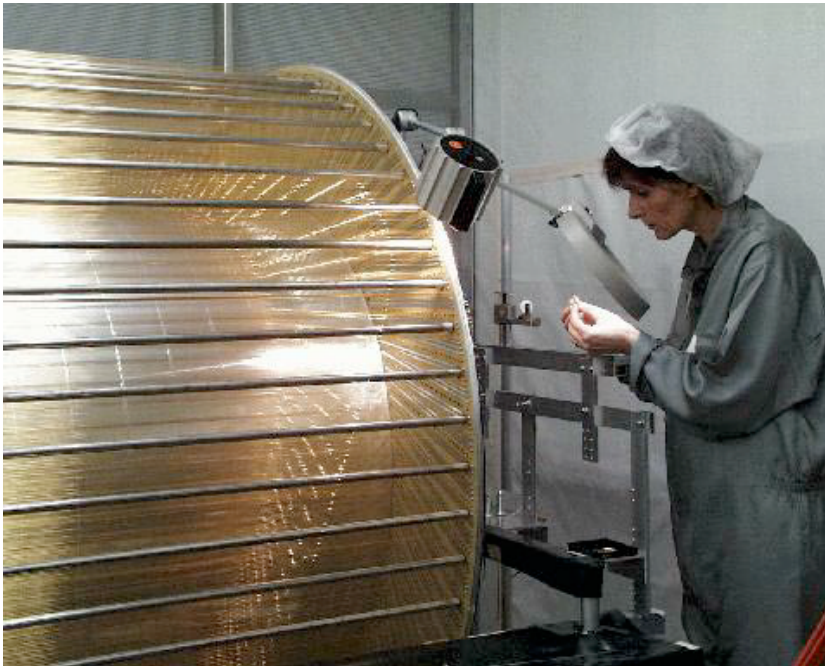
$$d = |\vec{v}|(t_a - t_0)$$

Remarque: $v_e \approx 1000 v_{\text{ions}}$



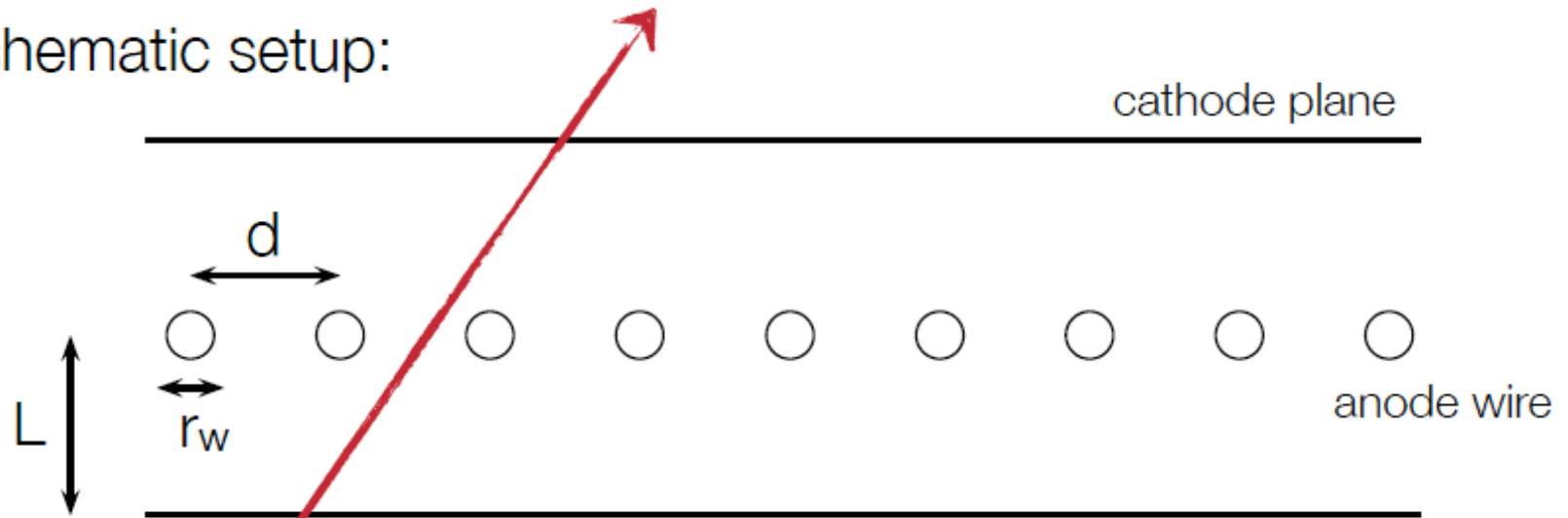
Chambre à dérive

- Chambre centrale cylindrique de l'expérience H1 (HERA)
- 15000 fils
- tension mécanique des fils ~ 6 tonnes



Chambre à dérivate

Schematic setup:



Parameters:

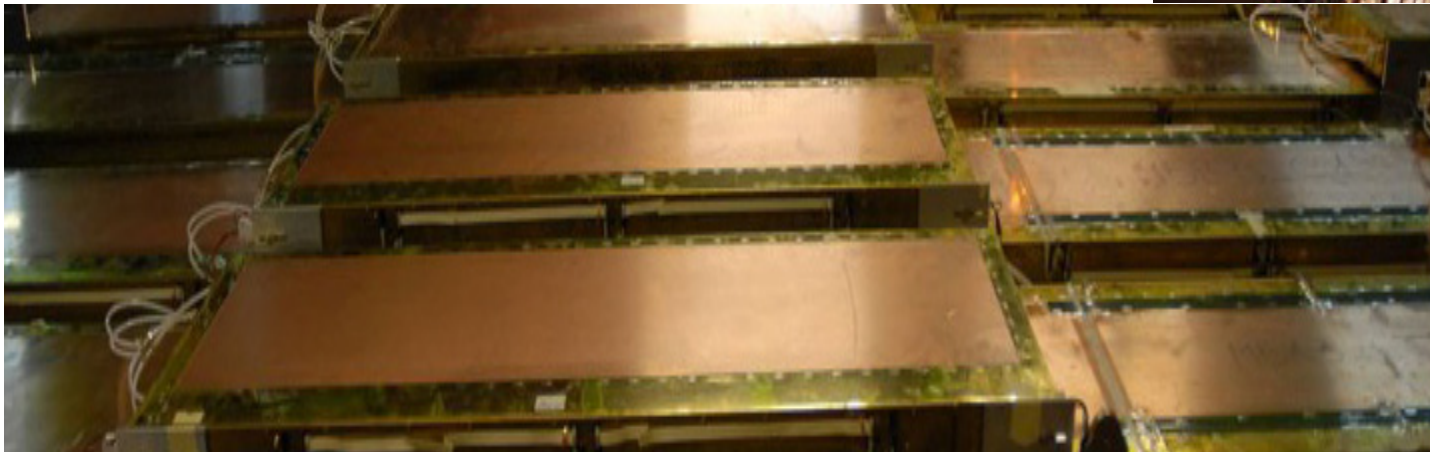
- d = 2 - 4 mm
- r_w = 20 - 25 μm
- L = 3 - 6 mm
- U_0 = several kV
- Total area: $O(\text{m}^2)$

Features:

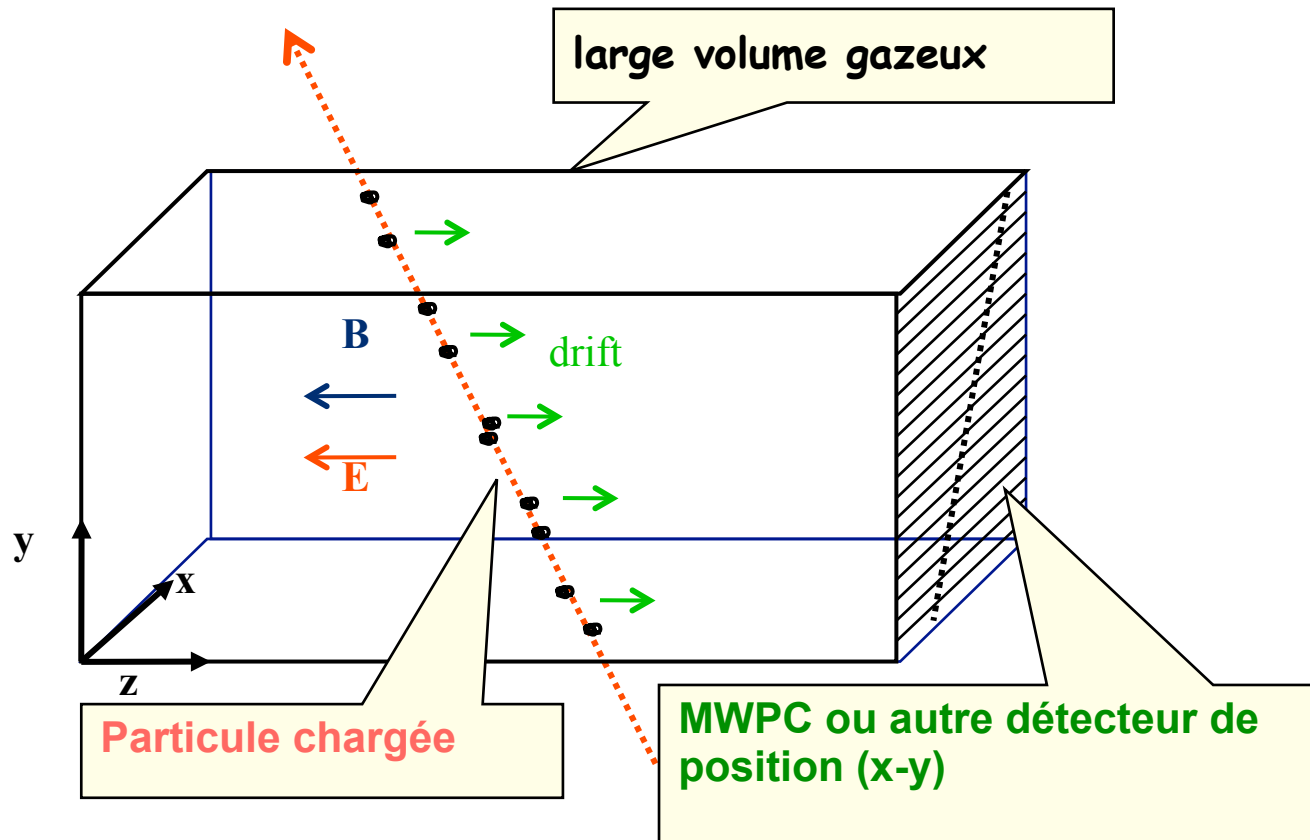
- Tracking of charged particles
- Some PID capabilities via dE/dx
- Large area coverage
- High rate capabilities

Chambre proportionnelle multifils (MWPC)

- Exemple : les chambres à muons du détecteur LHCb au LHC : couvre une surface de $\sim 435 \text{ m}^2$ avec 1400 chambres et quelque 2.5 millions de fils !



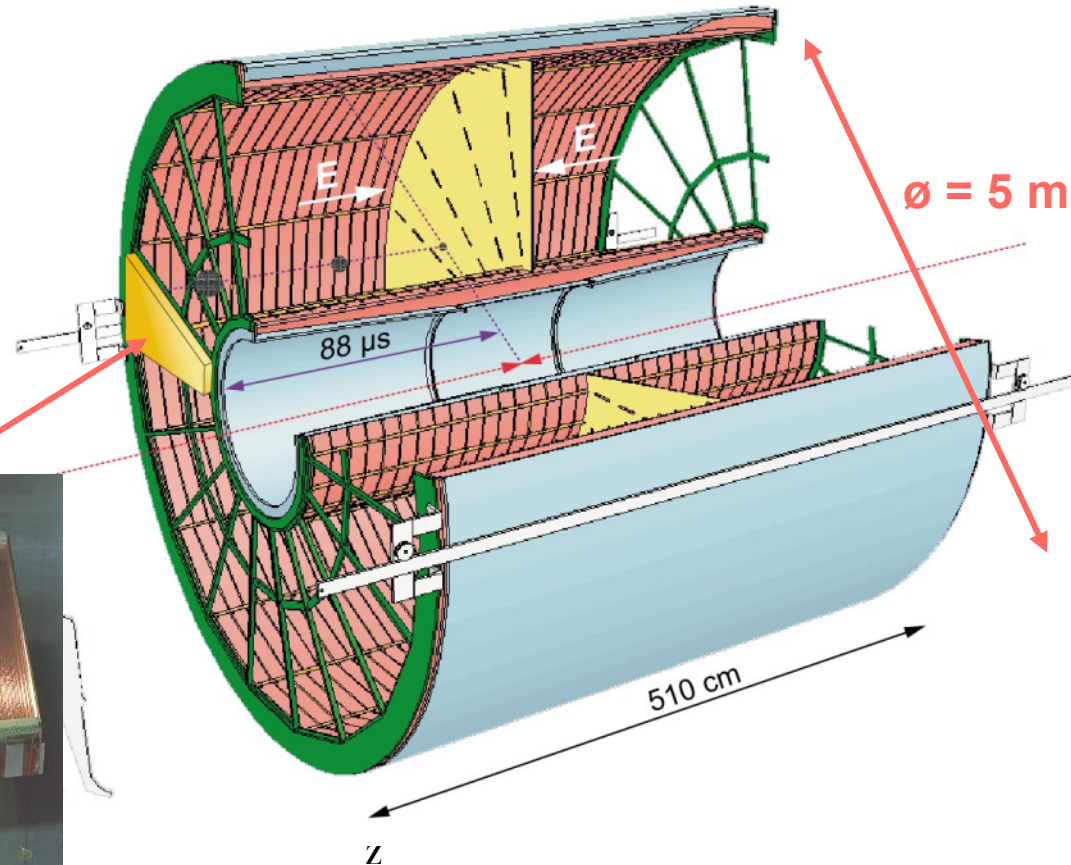
La chambre à projection temporelle (TPC)



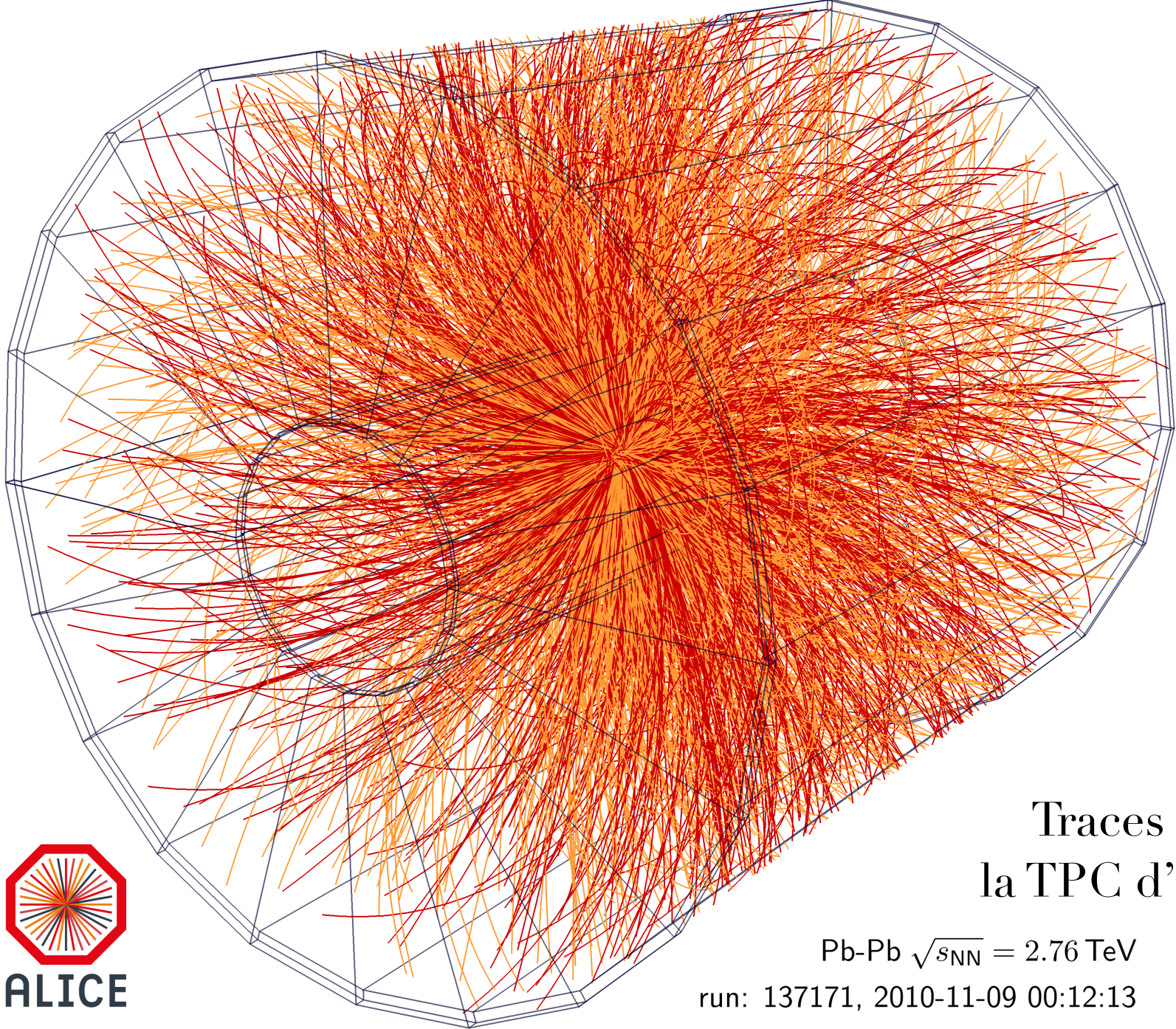
- permet une reconstruction complète dans un seul sous-détecteur
- de couvrir un grand volume
- bonne mesure de dE/dx

Exemple : la TPC d'ALICE (LHC) pour étudier les collisions d'ions lourds.

- $E : 400\text{V/cm}$
- Gain du gaz $> 10^4$
- Résolution spatiale
 $\sigma_{x,y} = 0.25\text{mm}$
 $\sigma_z = 1\text{ mm}$
- $B: 0.5\text{T}$



La plus grande TPC à gaz jamais construite :
 88 m^3 de gaz !

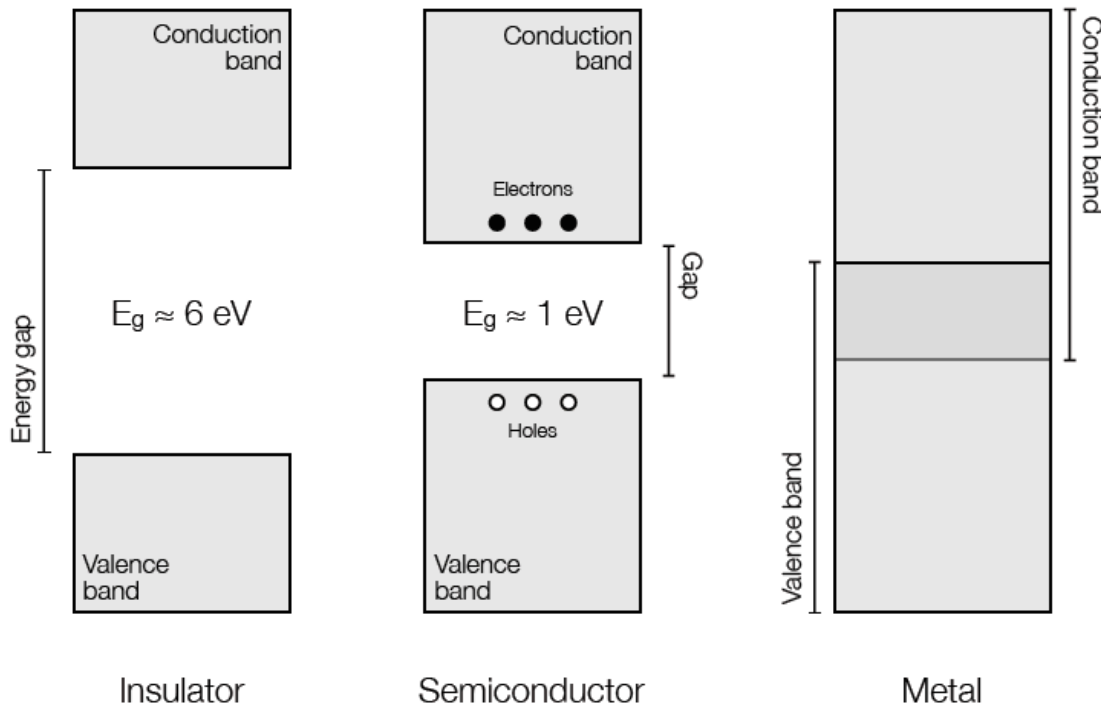


Traces dans la TPC d'ALICE

Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

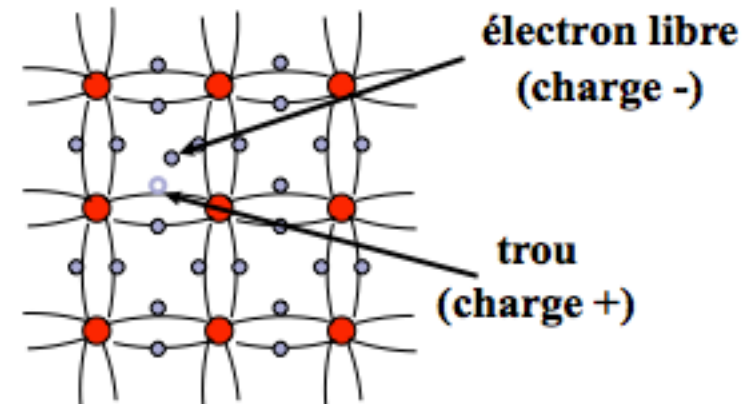
run: 137171, 2010-11-09 00:12:13

3.b Détecteurs à semi-conducteurs

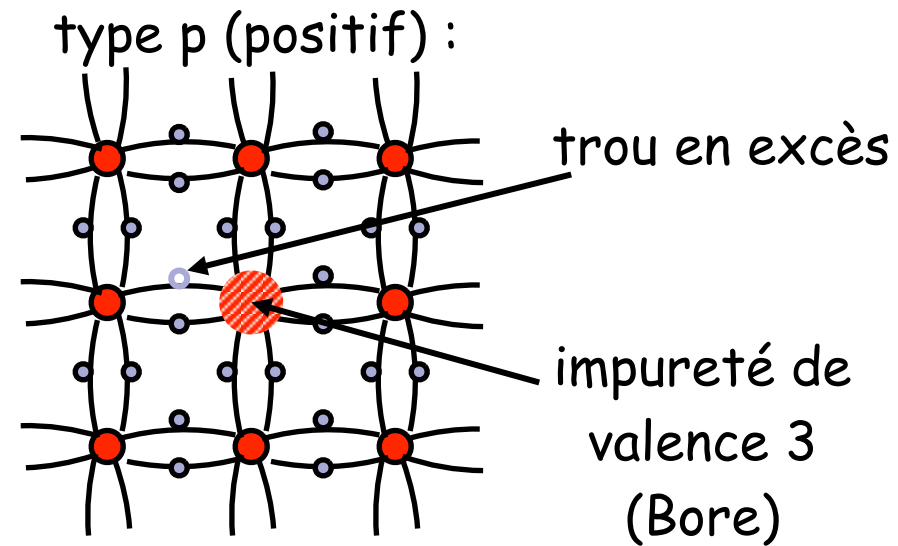
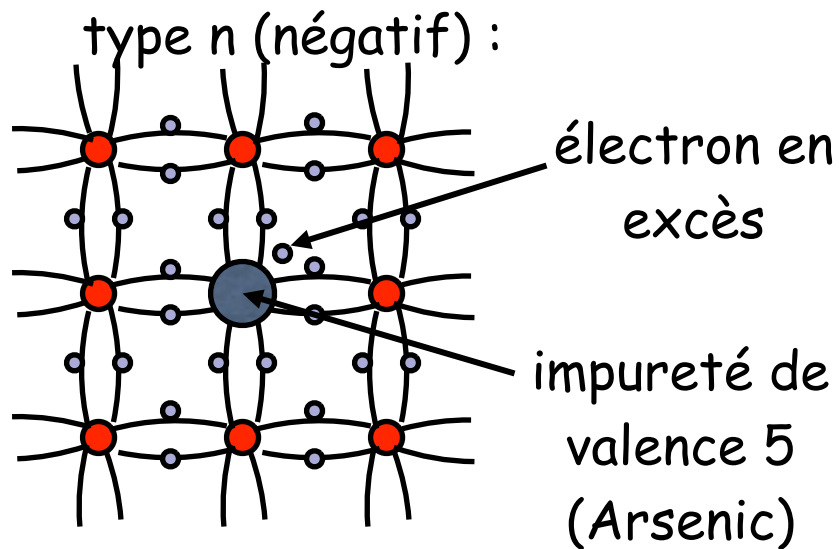


semi-conducteurs	E_{gap}
Si	1.11 eV
Ge	0.67 eV
isolants	E_{gap}
gaz noble	30 eV
scintillateur	100 eV

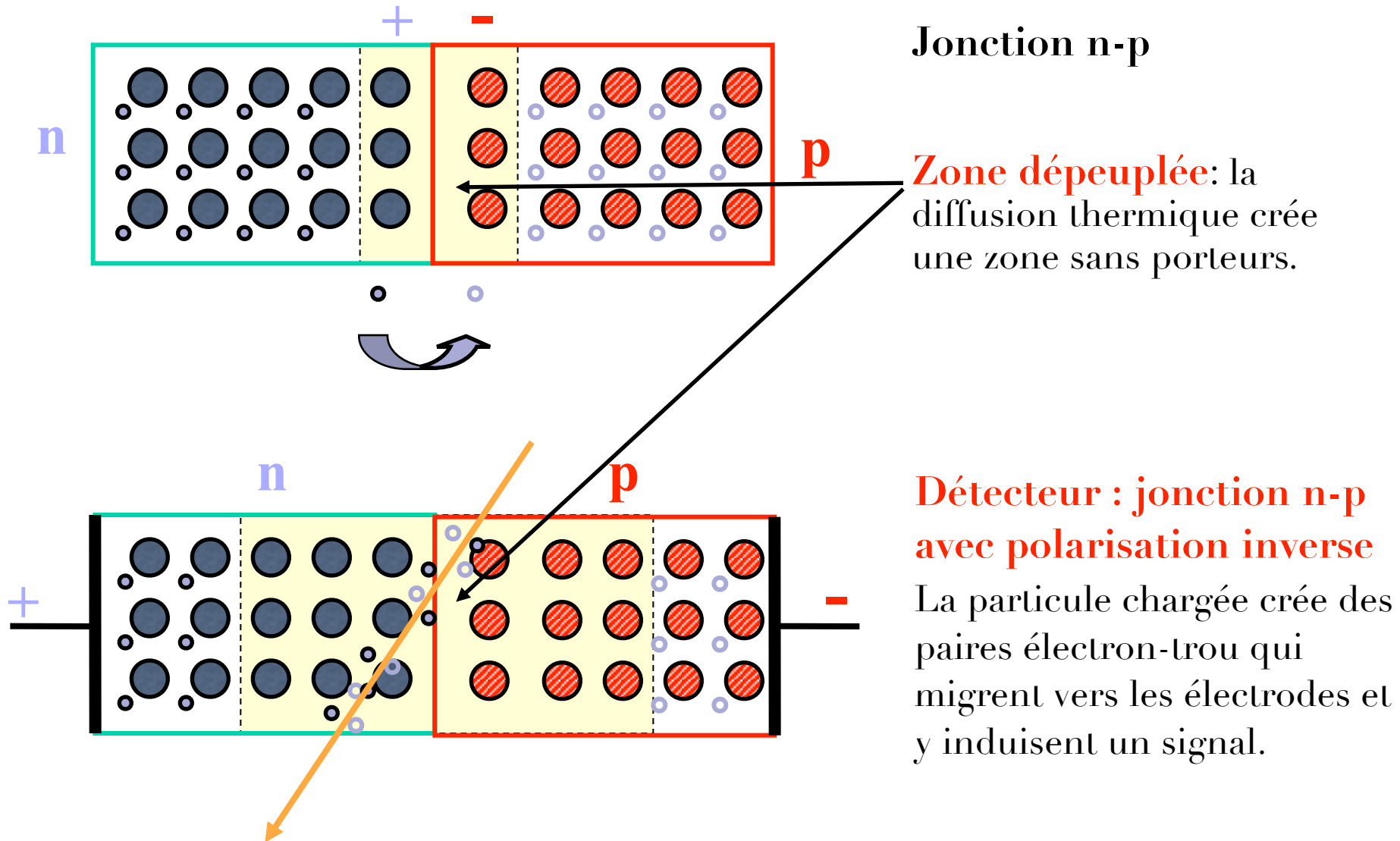
Exemple :
le silicium
(valence 4)



- pour augmenter le nombre de charges collectées
→ doper le semi-conducteur, avec un faible pourcentage d'impuretés.



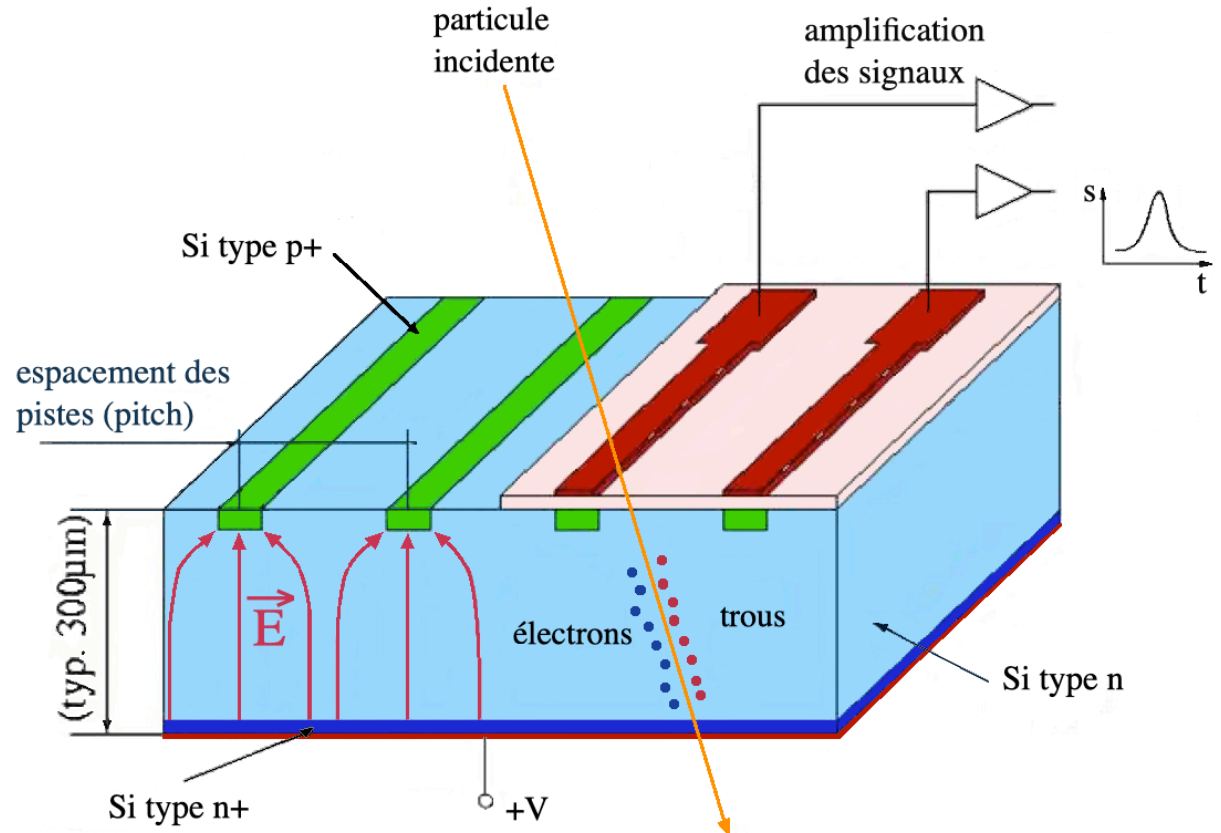
Détecteurs à semi-conducteurs



Les détecteurs à pistes pour un traceur (Si)

- une des électrodes est segmentée en fines pistes, chacune pouvant être connectée à un amplificateur.
- La distance entre 2 pistes, p , est typiquement de $20\text{ }\mu\text{m}$ à $200\text{ }\mu\text{m}$.
- Si toutes les pistes sont lues de manière binaire la résolution spatiale est donnée par :

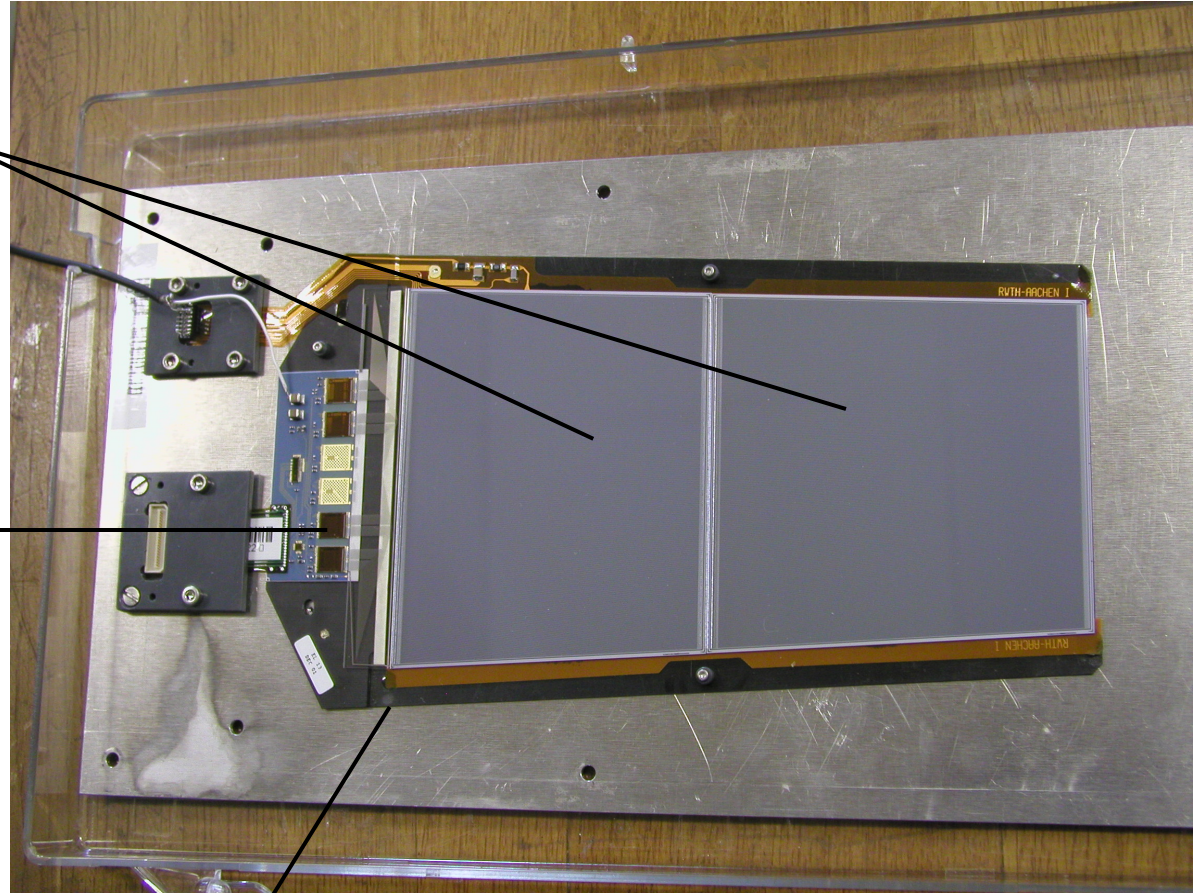
$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}} ; 5 - 50\text{ }\mu\text{m}$$



Le trajectographe (tracker) de CMS

Substrat silicium
jonction n-p épaisseur de
500 μm (ou 320 μm)
512 (ou 768) pistes

hybride
avec 4 (ou 6) puces de
lecture à 128 voies

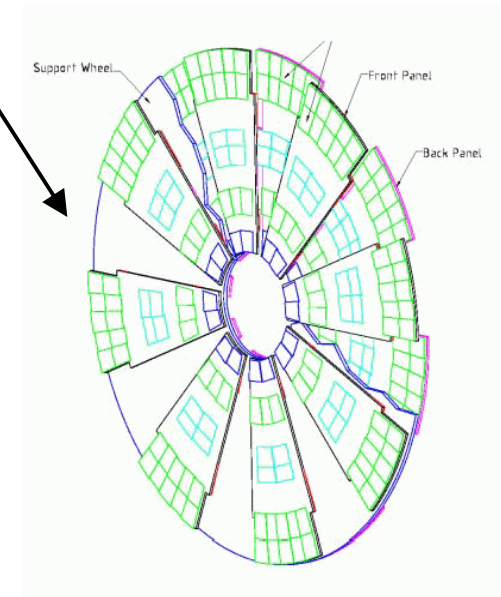
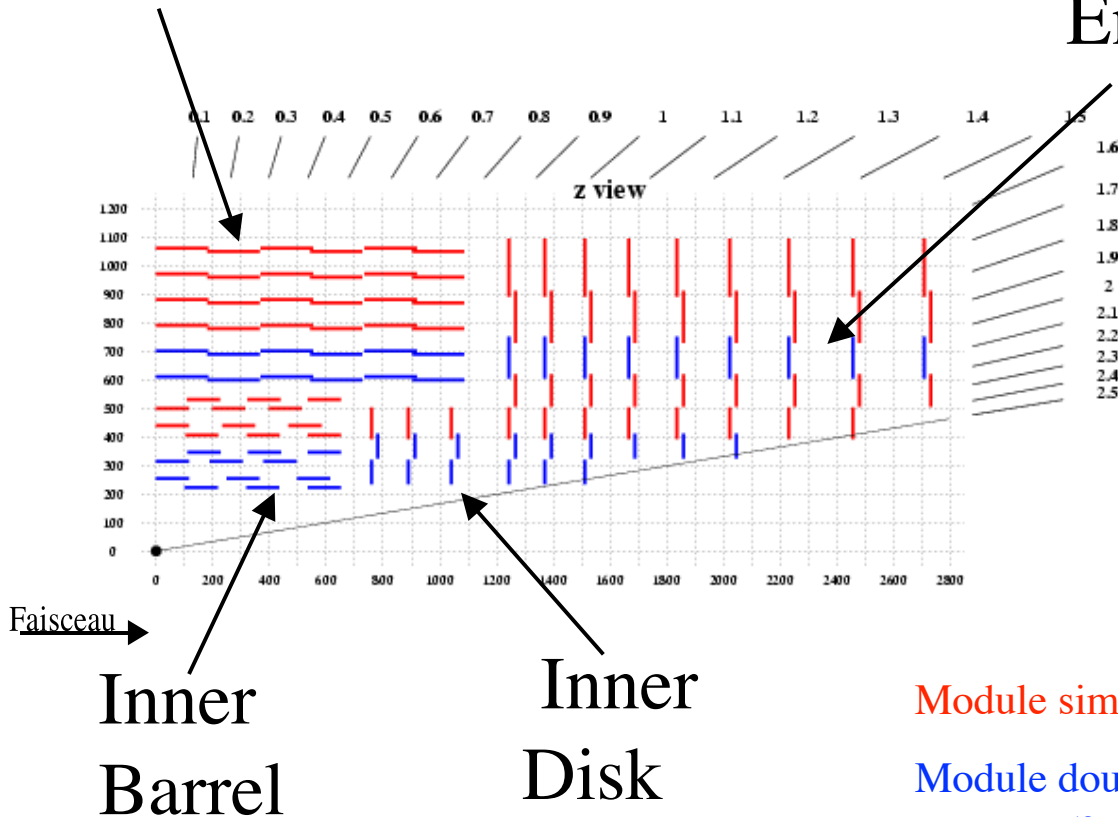


cadre évacuant la chaleur

Le trajectographe (tracker) de CMS

Outer Barrel (tonneau)

EndCap (bouchon)

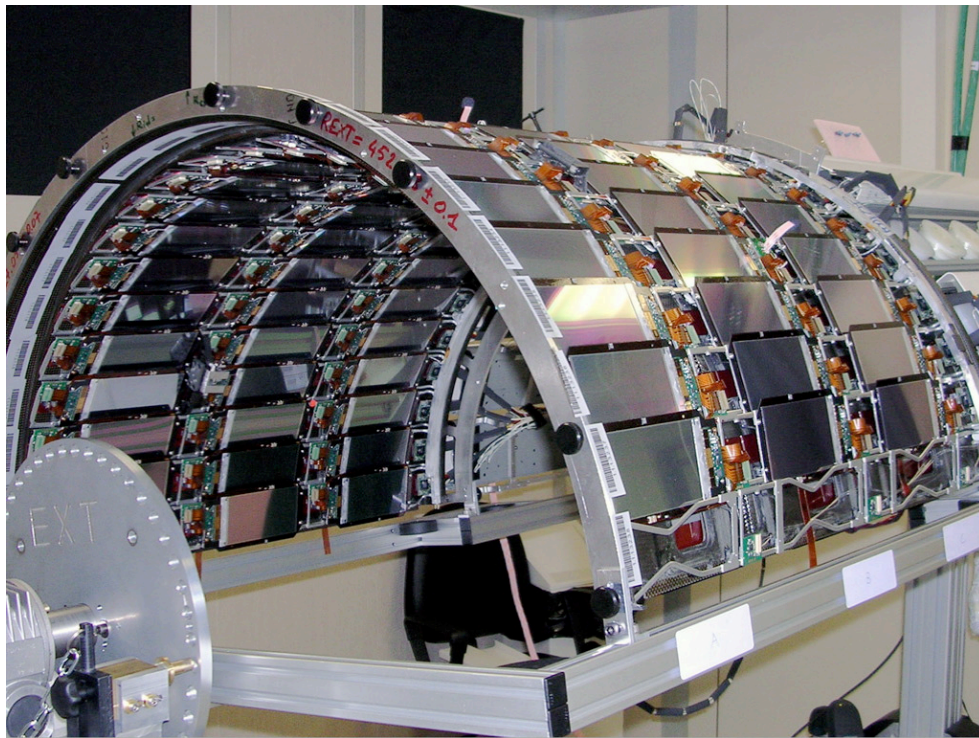


(2 modules simple face collés dos à dos)

Les détecteurs sont assemblés en sous-structures

exemples celles du trajectographe de CMS :

Des rangées (rods), pour la partie tonneau

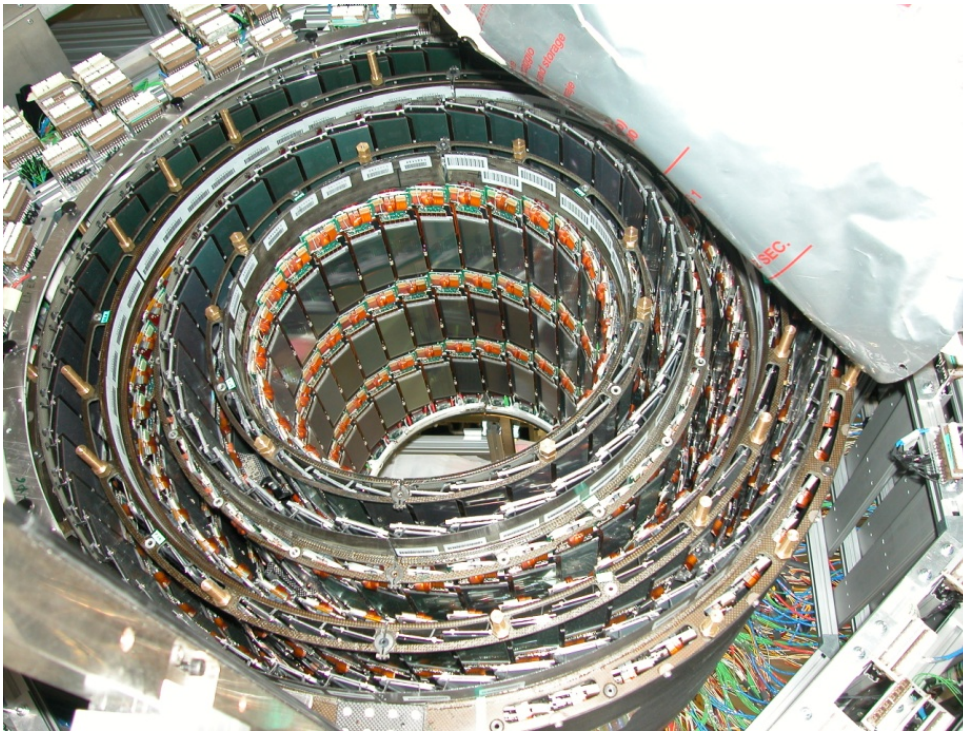


Des secteurs (pétales) pour les roues des bouchons



Les sous-structures sont ensuite arrangées en :

**Couches cylindriques concentriques,
pour la partie tonneau**



En roues pour les bouchons



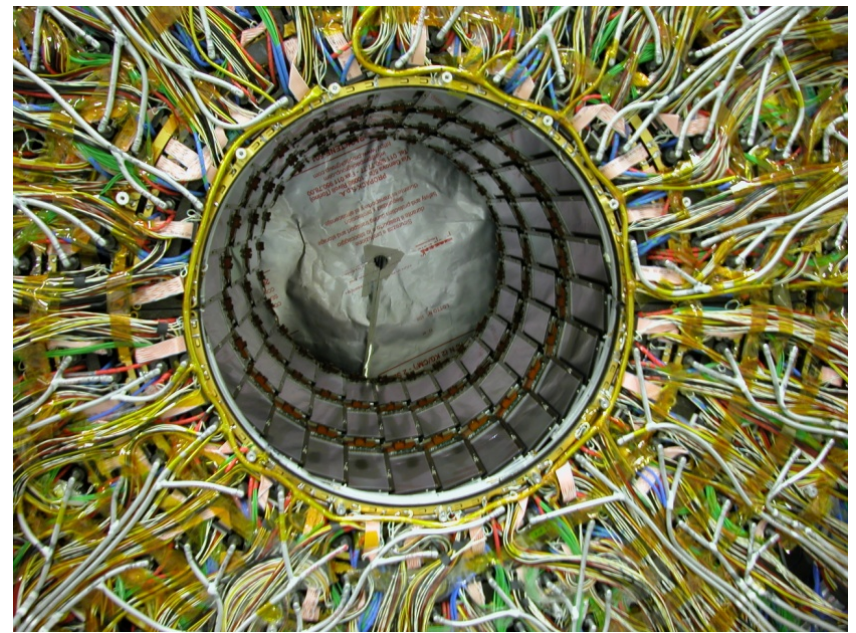
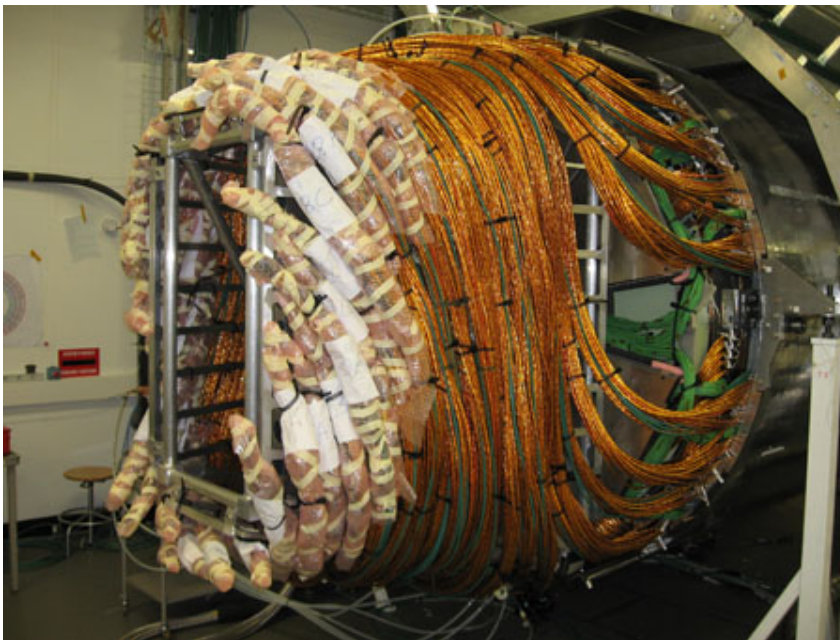
Le traceur à pistes de CMS est le plus grand détecteur au Si jamais construit, plus grand d'un ordre de grandeur. Il comporte :

~15.000 détecteurs au Si

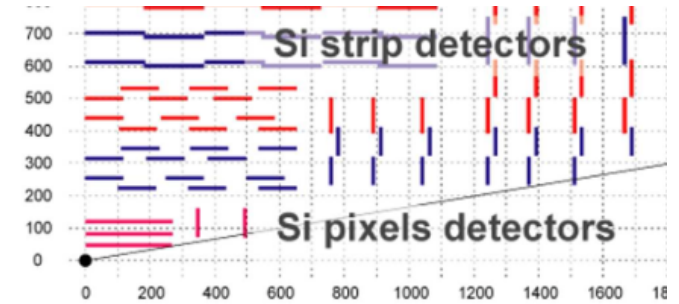
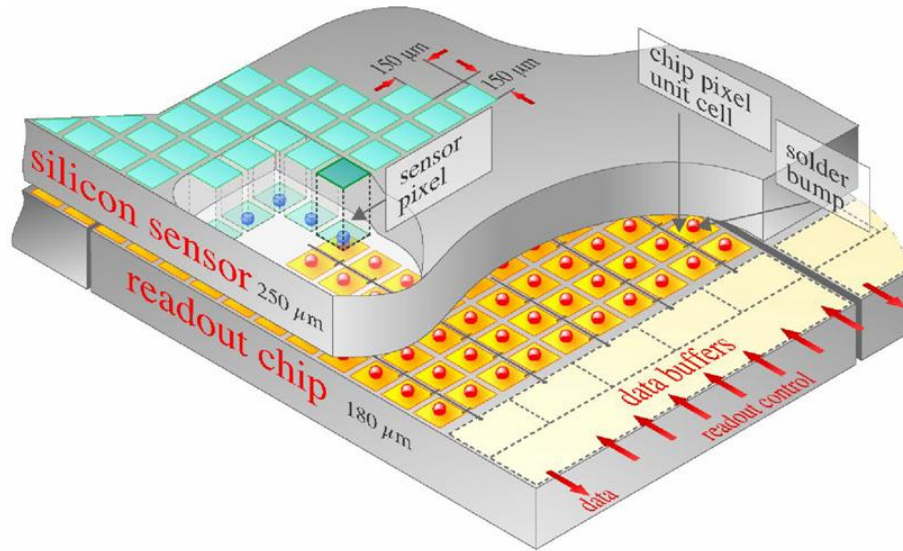
~214 m² de Si

~11 millions de canaux de lecture

**cables du traceur
interne (tonneau)**

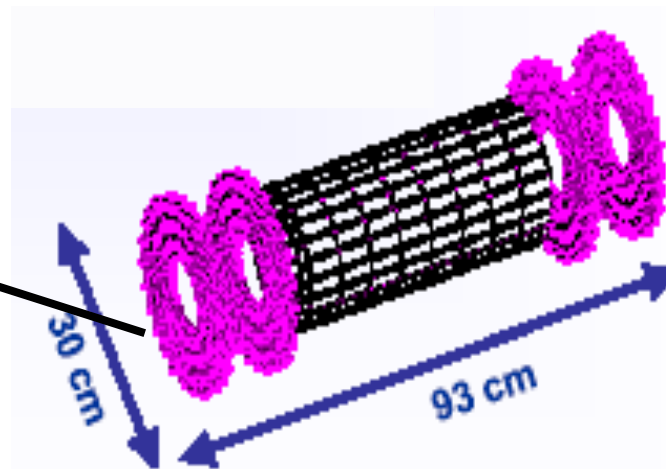
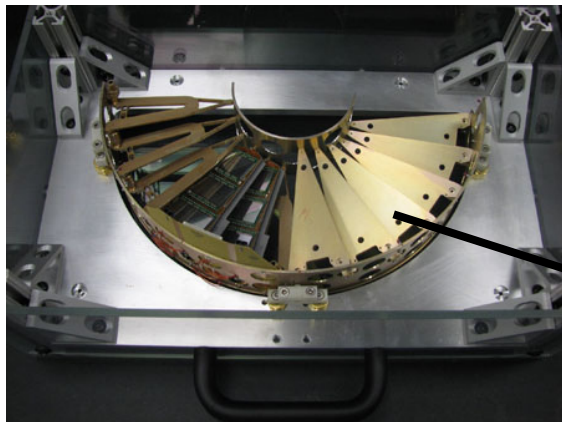


Semi-conducteurs: détecteurs à pixels

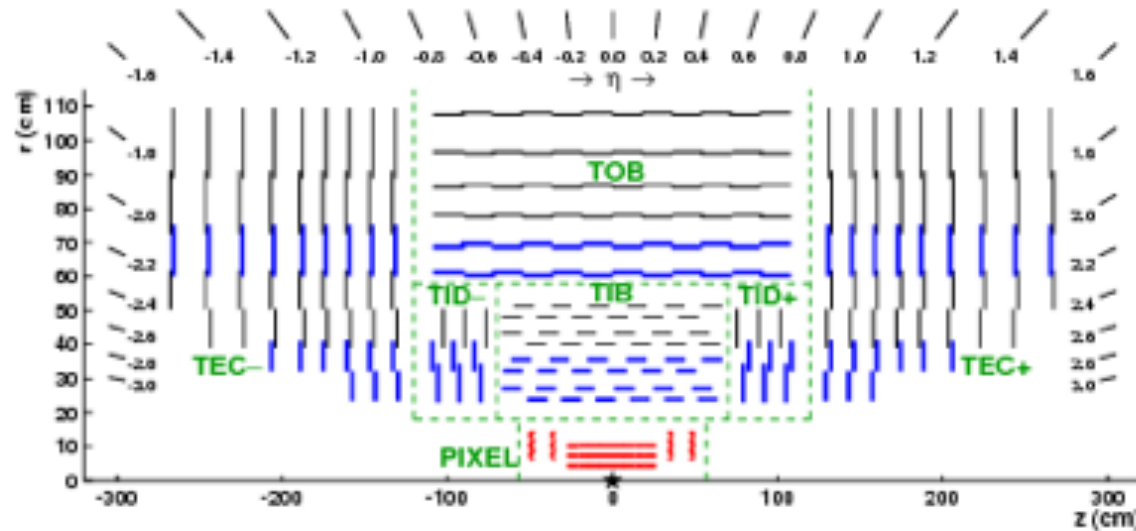


Détecteur de vertex à
pixels de CMS :
66 millions de pixels ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$)

$$\sigma_{r\phi} \sim \sigma_z \sim 15 \mu\text{m}$$



détecteurs de traces - matériaux morts



X_0 - longueur de radiation
 λ_I - longueur d'interaction (forte)

dans ce volume:

- 70% des photon se matérialisent
- 5% des pions de 5 GeV interagissent

pseudo-rapacité :

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

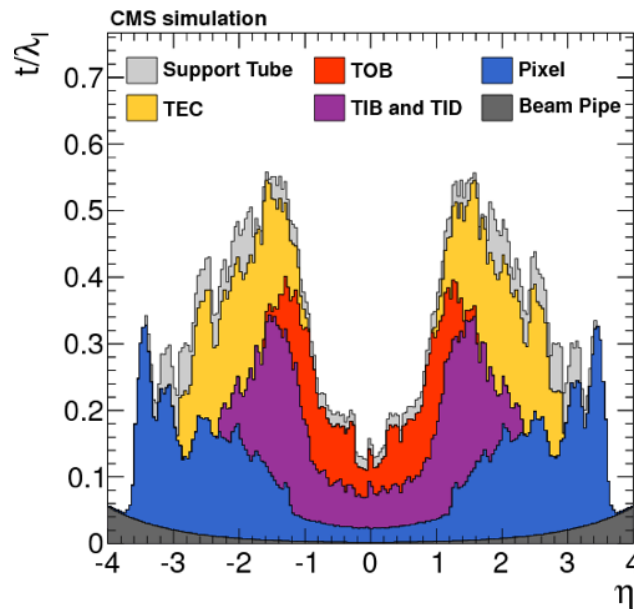
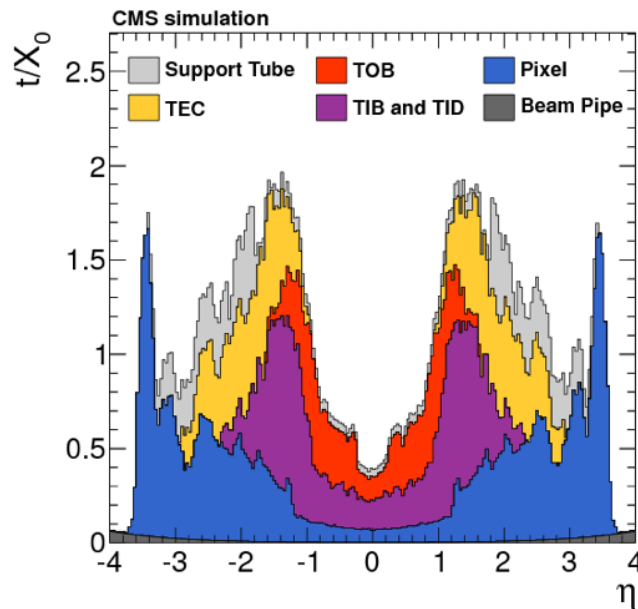
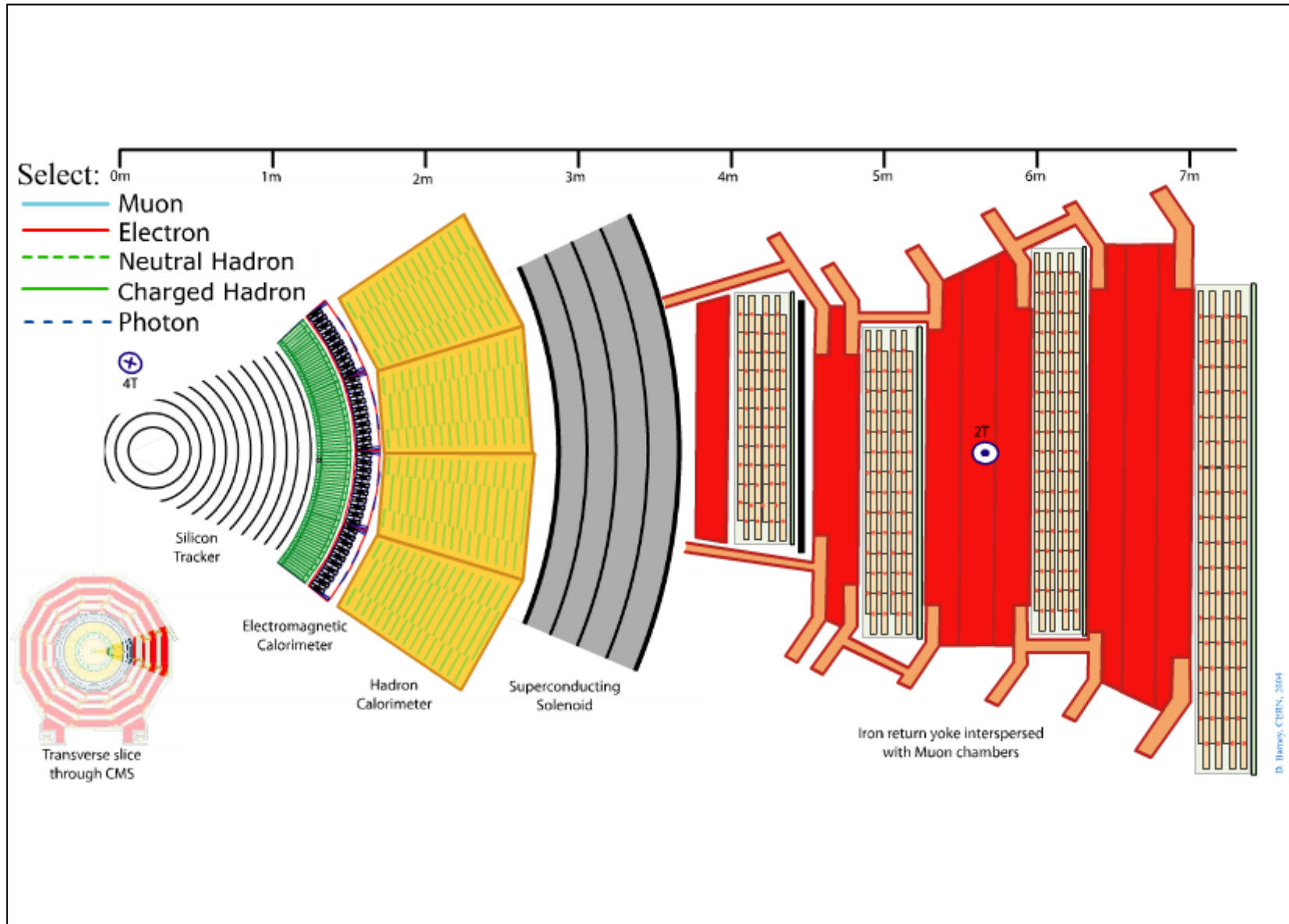
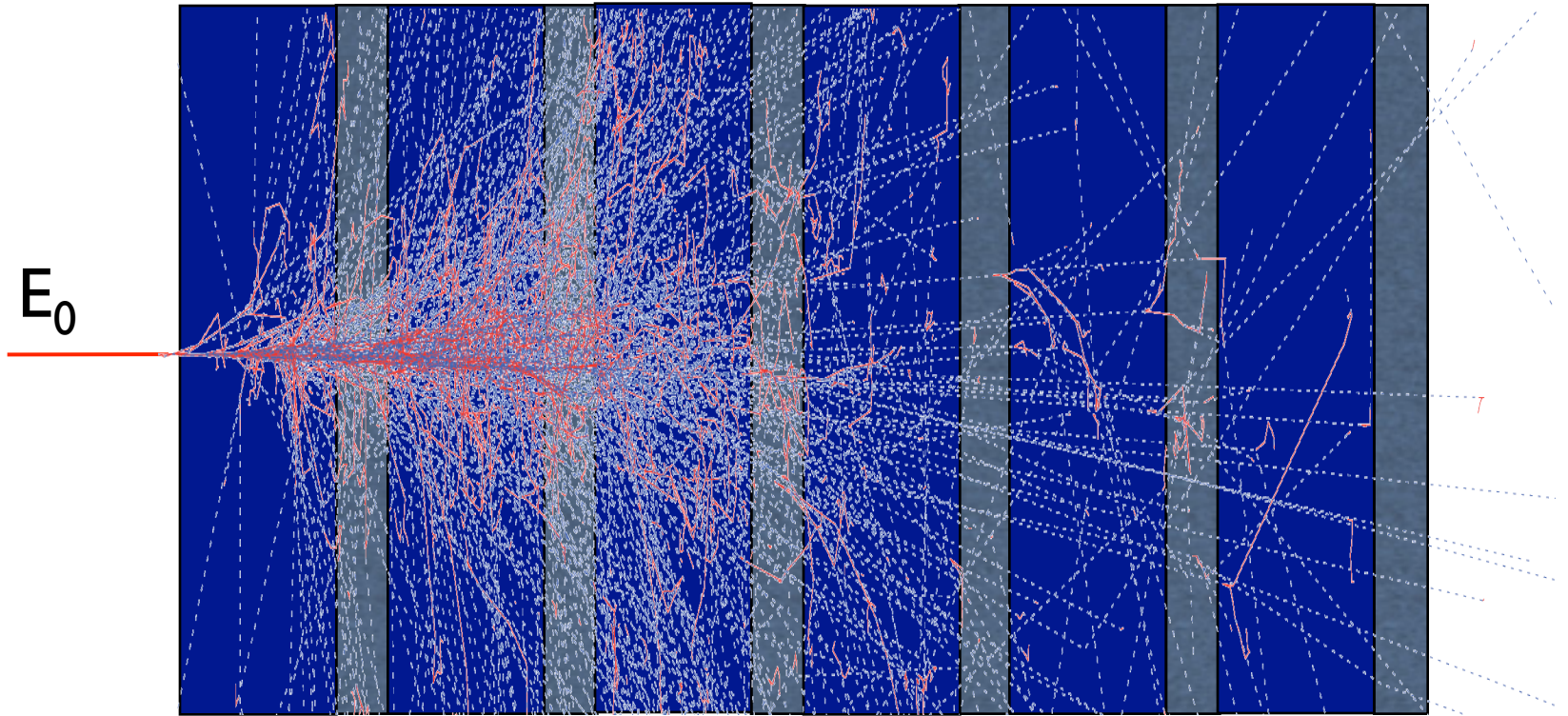


Schéma général de CMS



3.c Les calorimètres



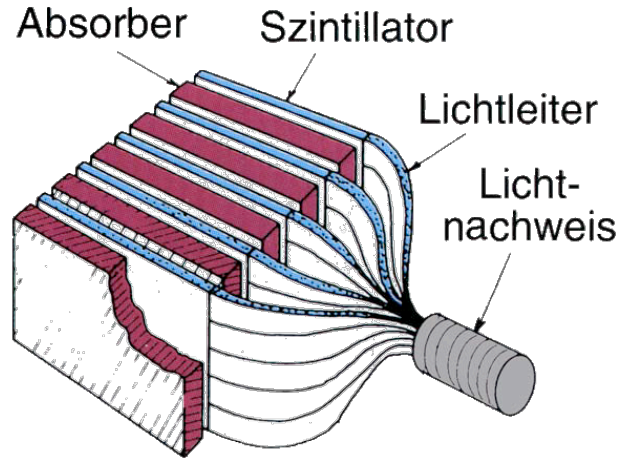
élément actif :



élément passif :



- calorimètre à échantillonnage



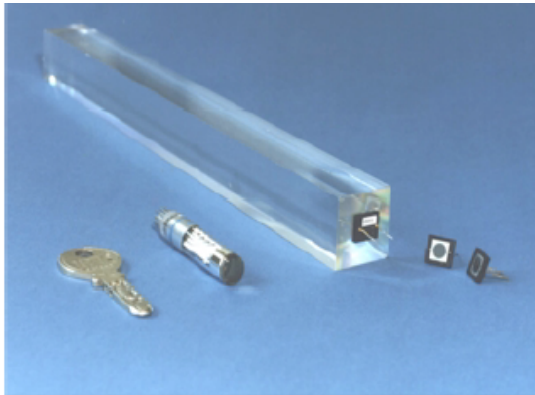
$$E^{rec} = C \sum_i E_i$$

↗ facteur de calibration

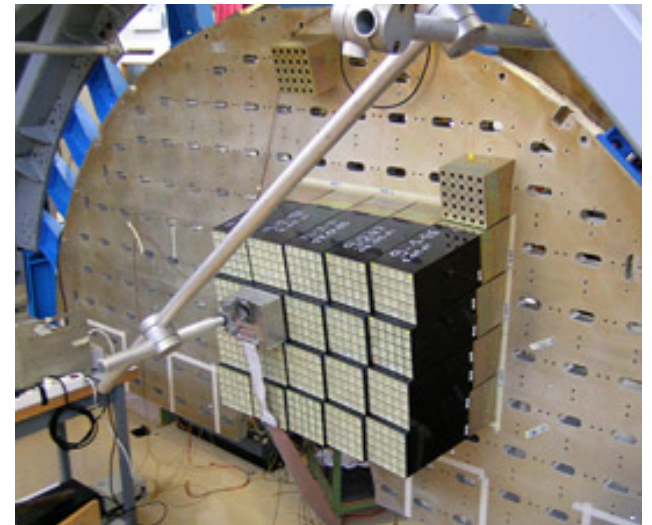
$$\frac{\Delta E^{rec}}{E^{rec}} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \simeq \frac{1}{\sqrt{E^{rec}}}$$

la résolution en énergie
croît avec l'énergie

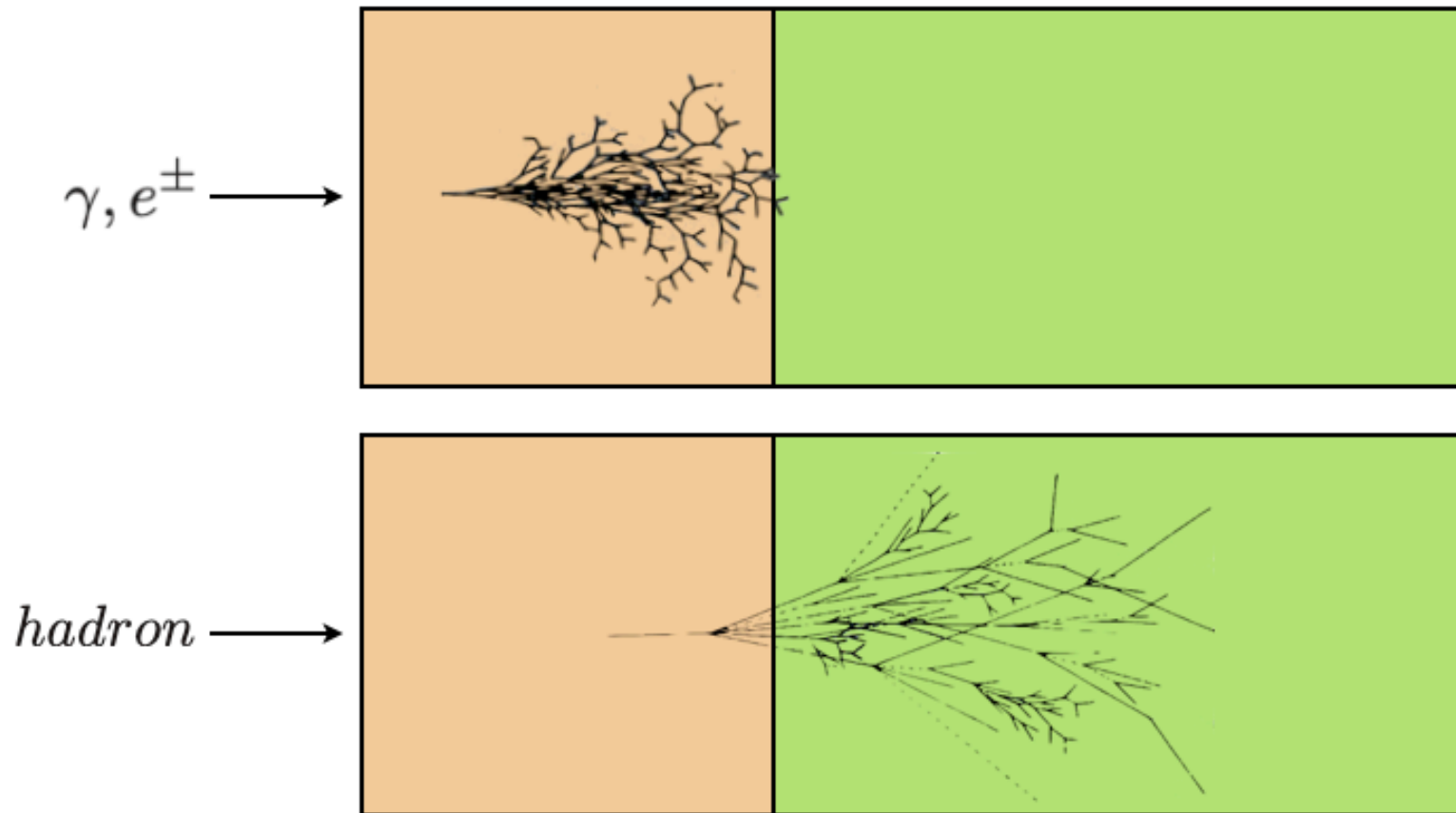
- calorimètre homogène



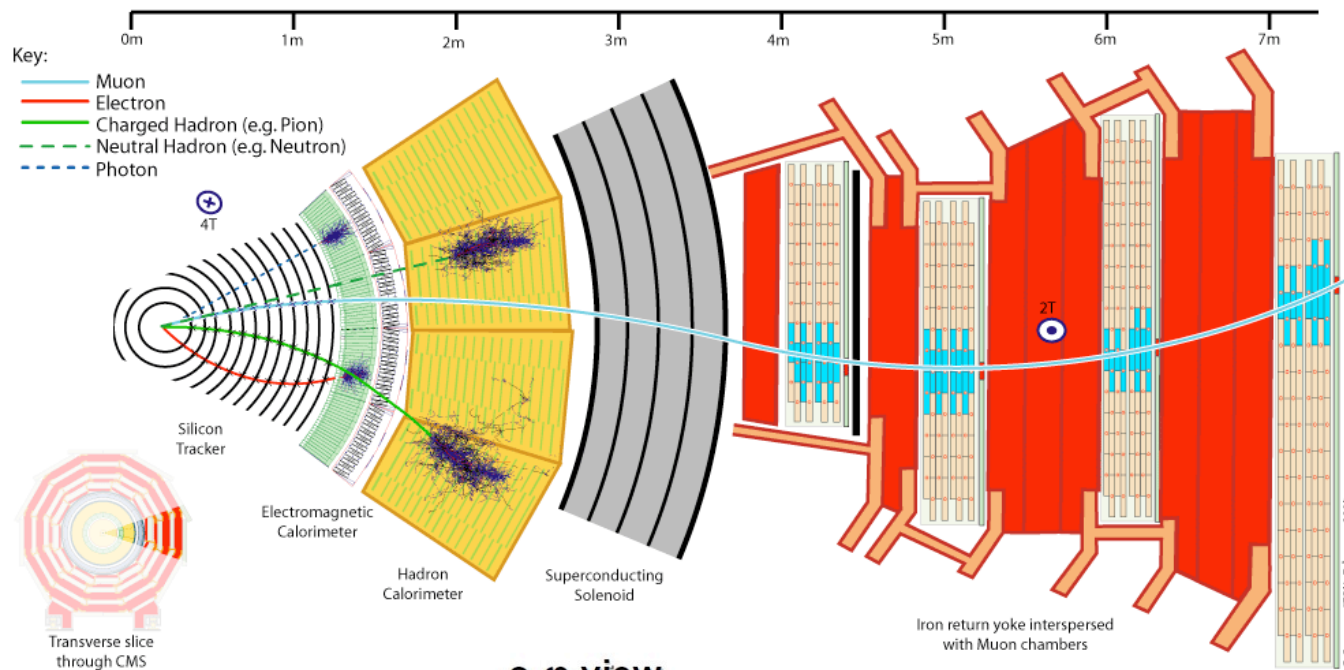
Le calorimètre é.m. de
CMS, constitué de plus de
80000 cristaux de PbW_4 ,
lus par des photodétecteurs.



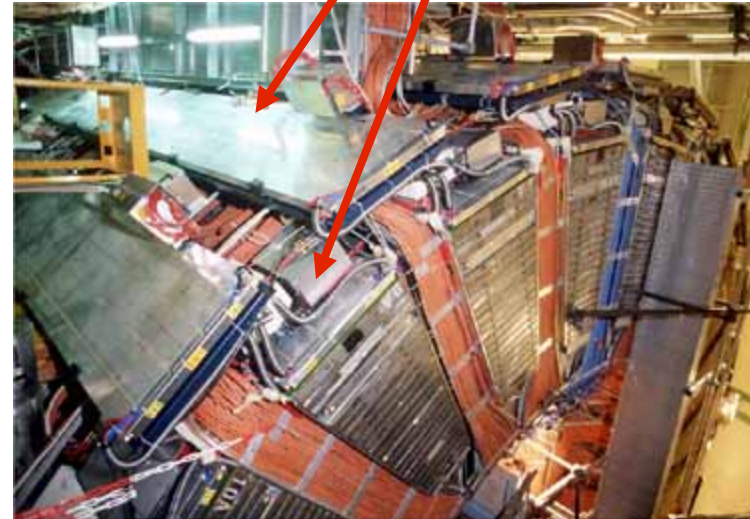
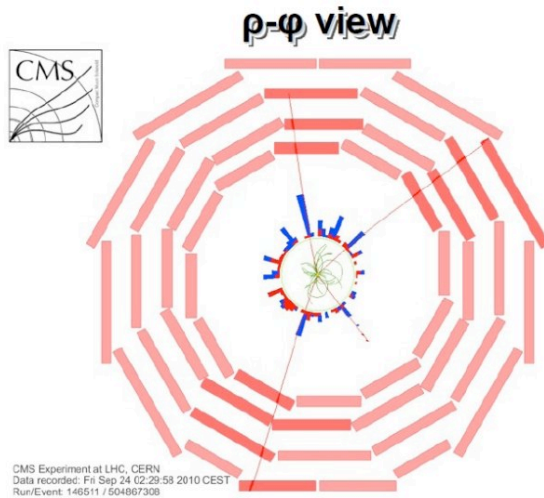
Les calorimètres



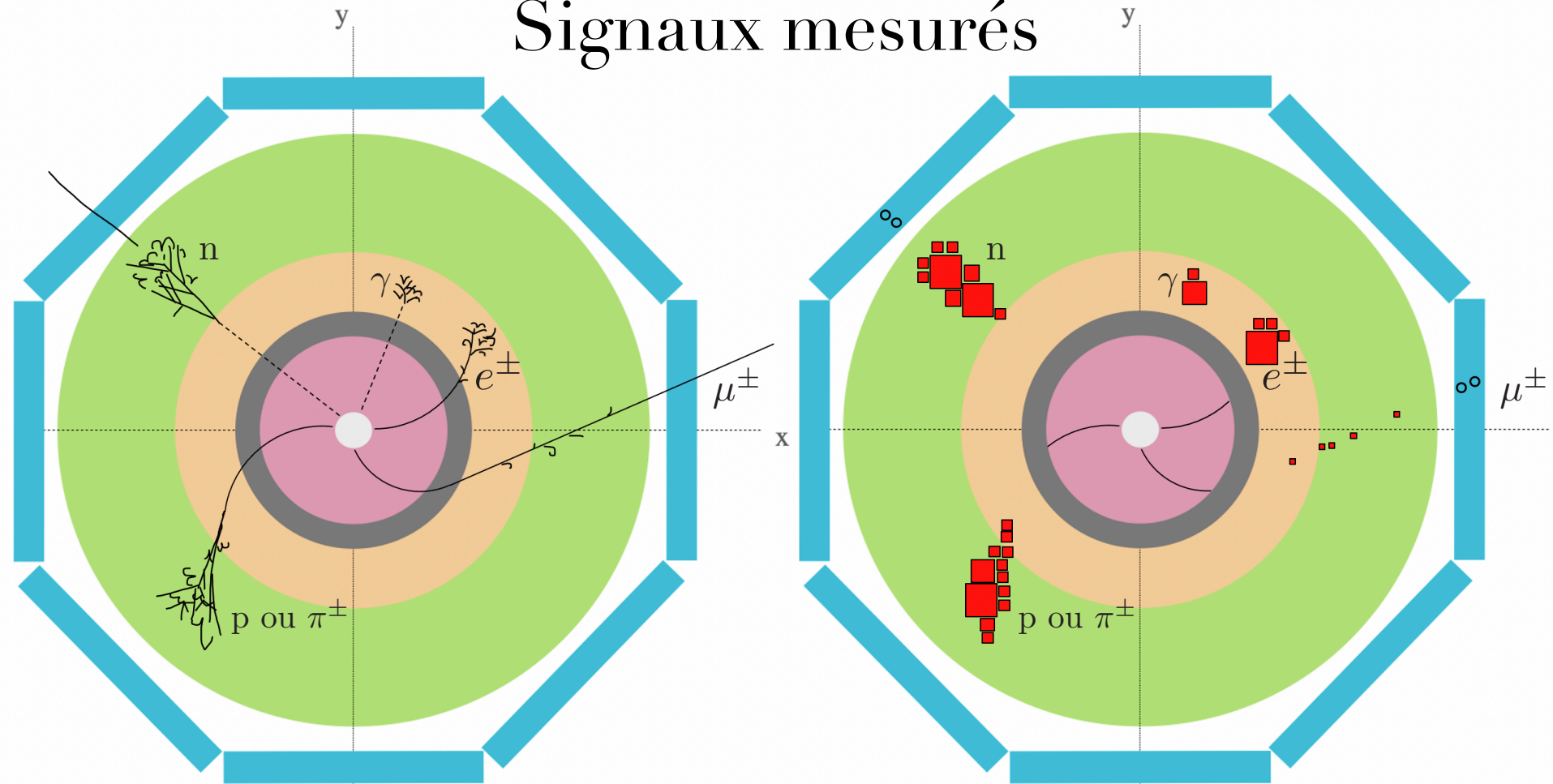
3.d Les détecteurs de muons



chambres à muons de DELPHI



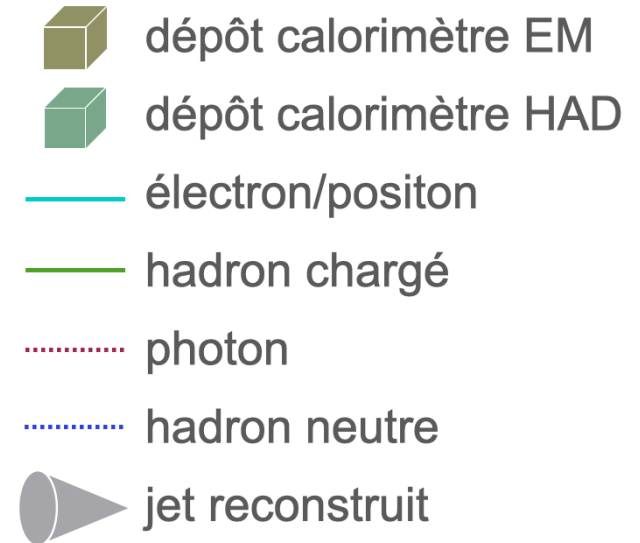
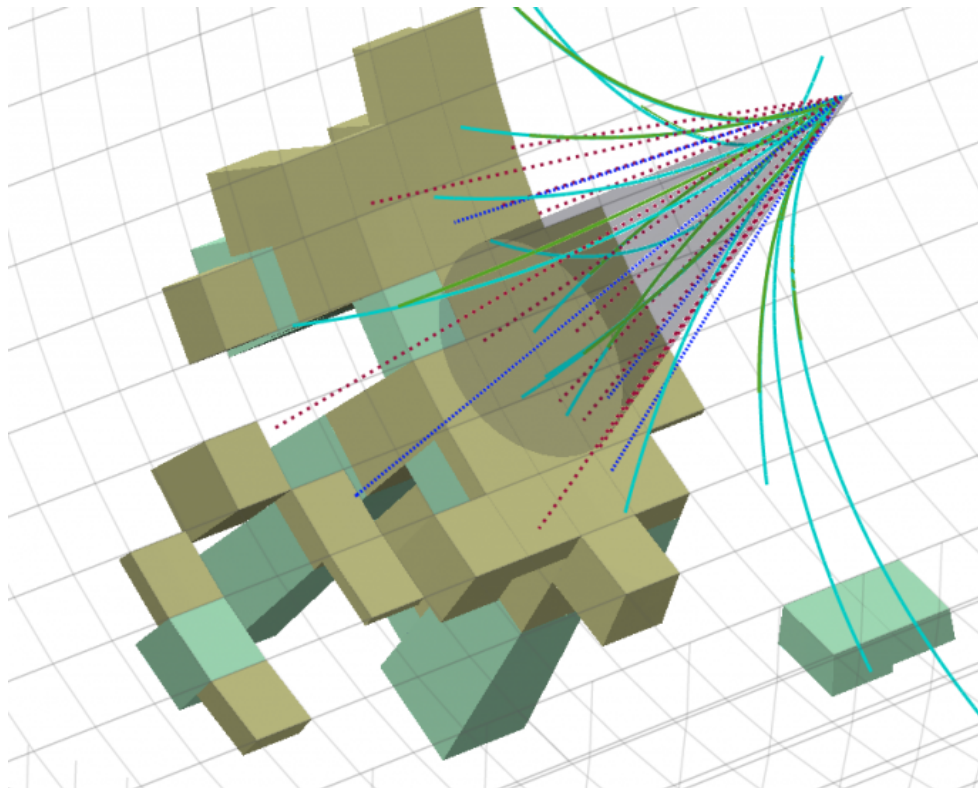
Signaux mesurés



	traceur	calo EM	calo HAD	dét. muons
électron	trace	énergie	-	-
photon		énergie	-	-
hadron chargé	trace	-	énergie	-
hadron neutre		-	énergie	-
muon	trace	-	-	impacts

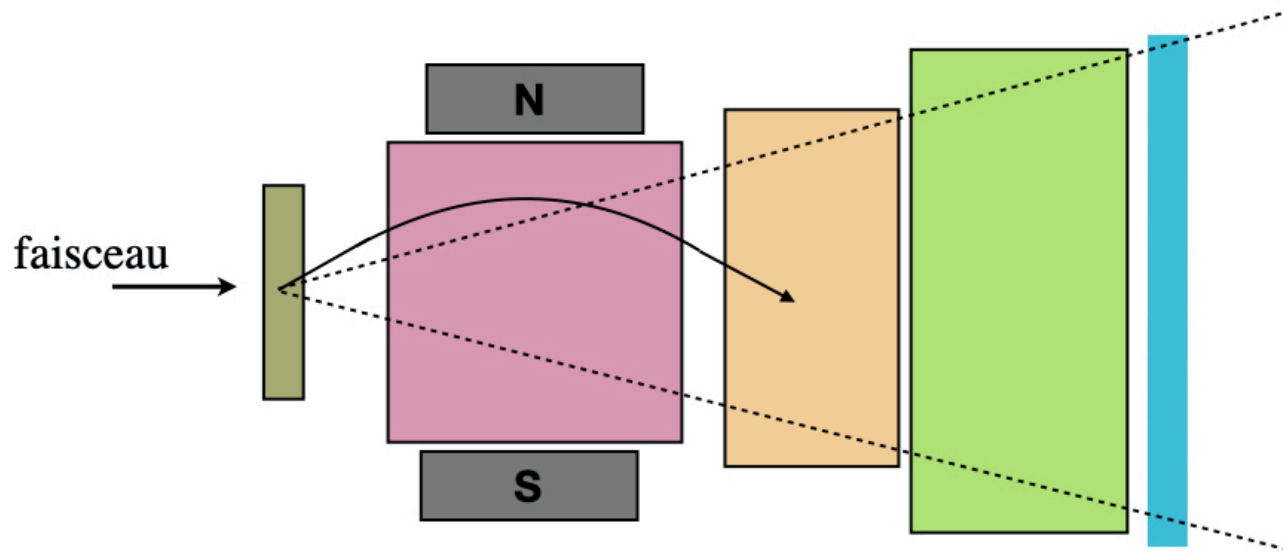
Les jets hadroniques

- à haute énergie les hadrons sont la plupart du temps regroupés en jets (ensemble de particules hadroniques ou issues de leurs désintégrations situées dans un cône).



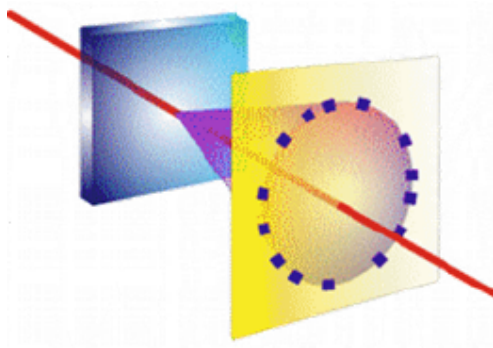
4. Expériences à cible fixe

- la géométrie du détecteur qui doit tenir compte de ce que les particules sont émises vers l'avant (conservation quantité de mvt).



- cible
- les détecteurs de traces
- le solénoïde
- le calorimètre électromagnétique
- le calorimètre hadronique
- le détecteur de muons

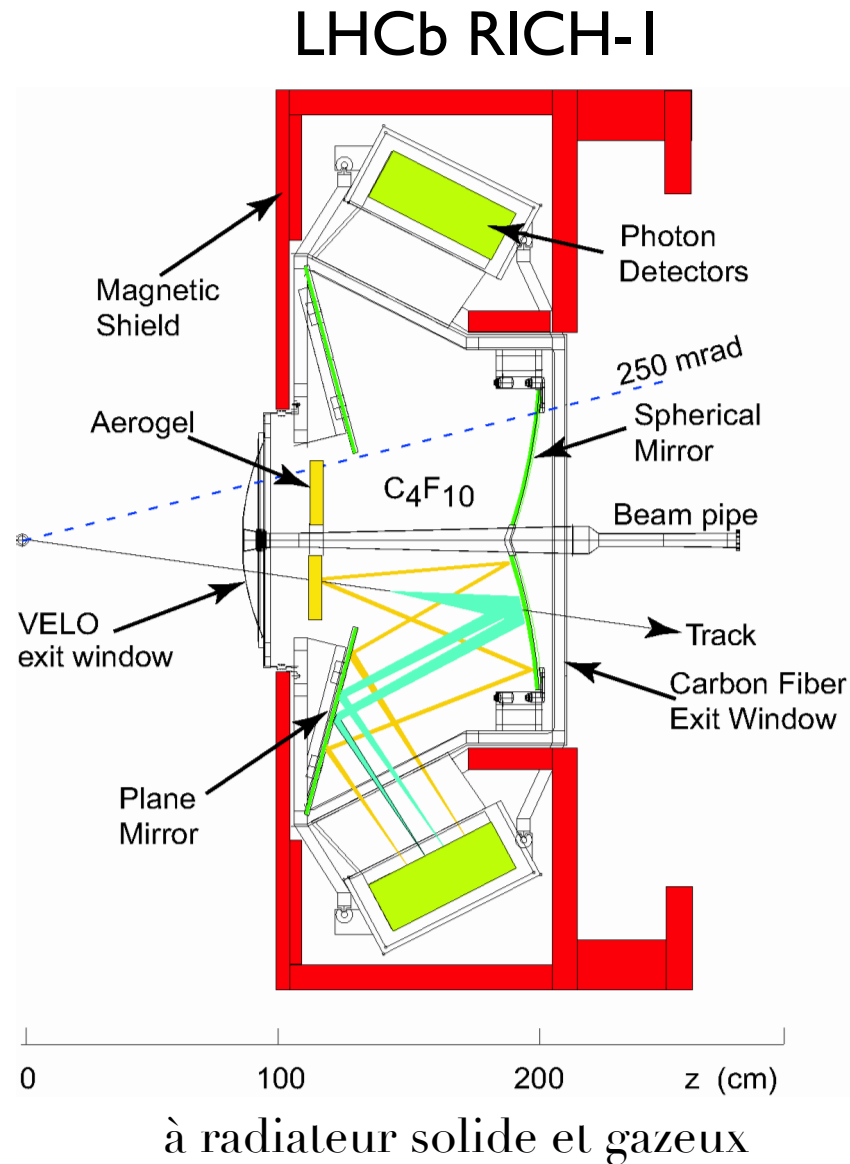
5. Ring Imaging Cherenkov (RICH)

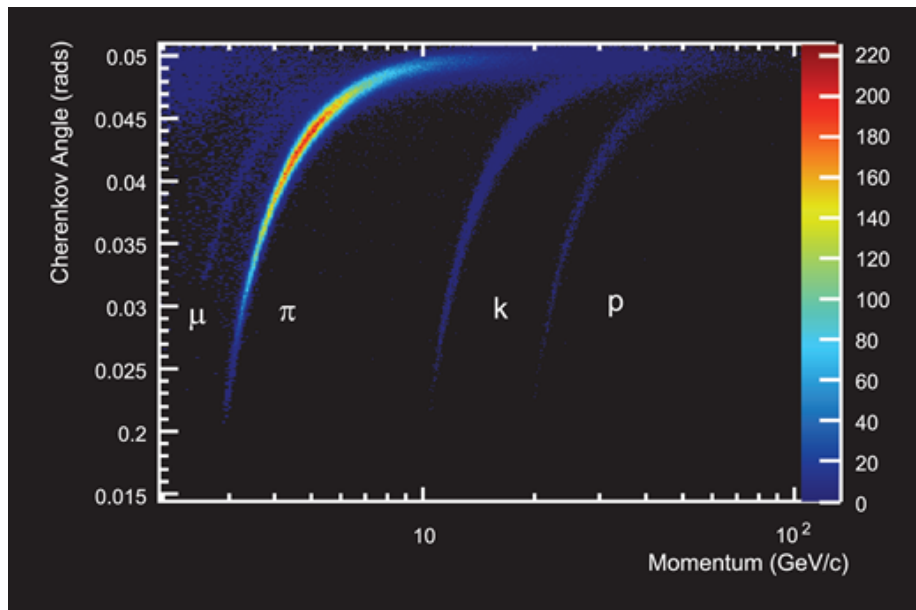


à radiateur solide - changement
de l'indice de réfraction

Deux anneaux de lumière produite

- dans l'aerogel
- dans le C_4F_{10}

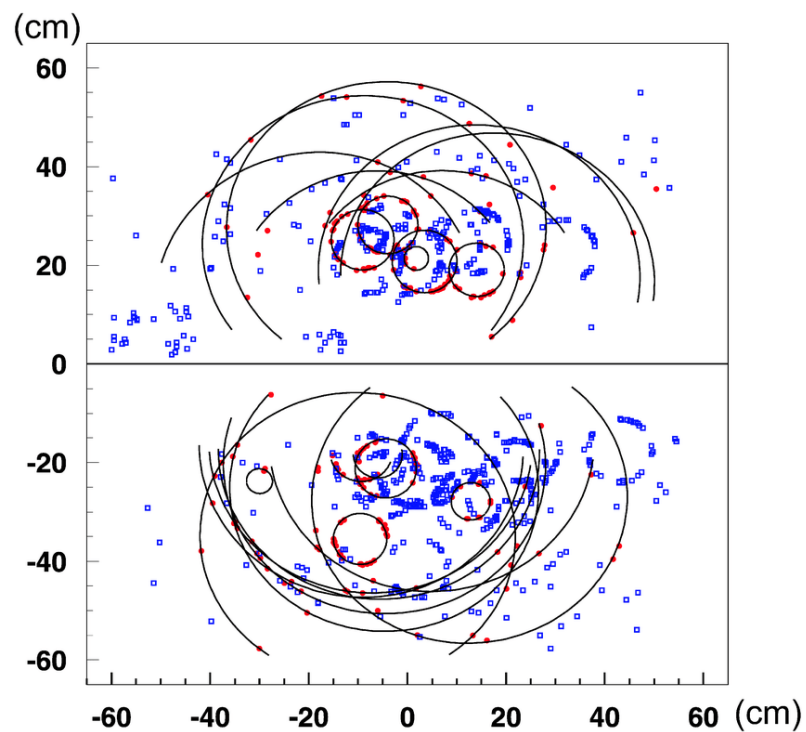




combinaison des mesures du traceur
VELO (momentum/impulsion) et du
RICH (Cherenkov angle)
→ identification

LHCb RICH

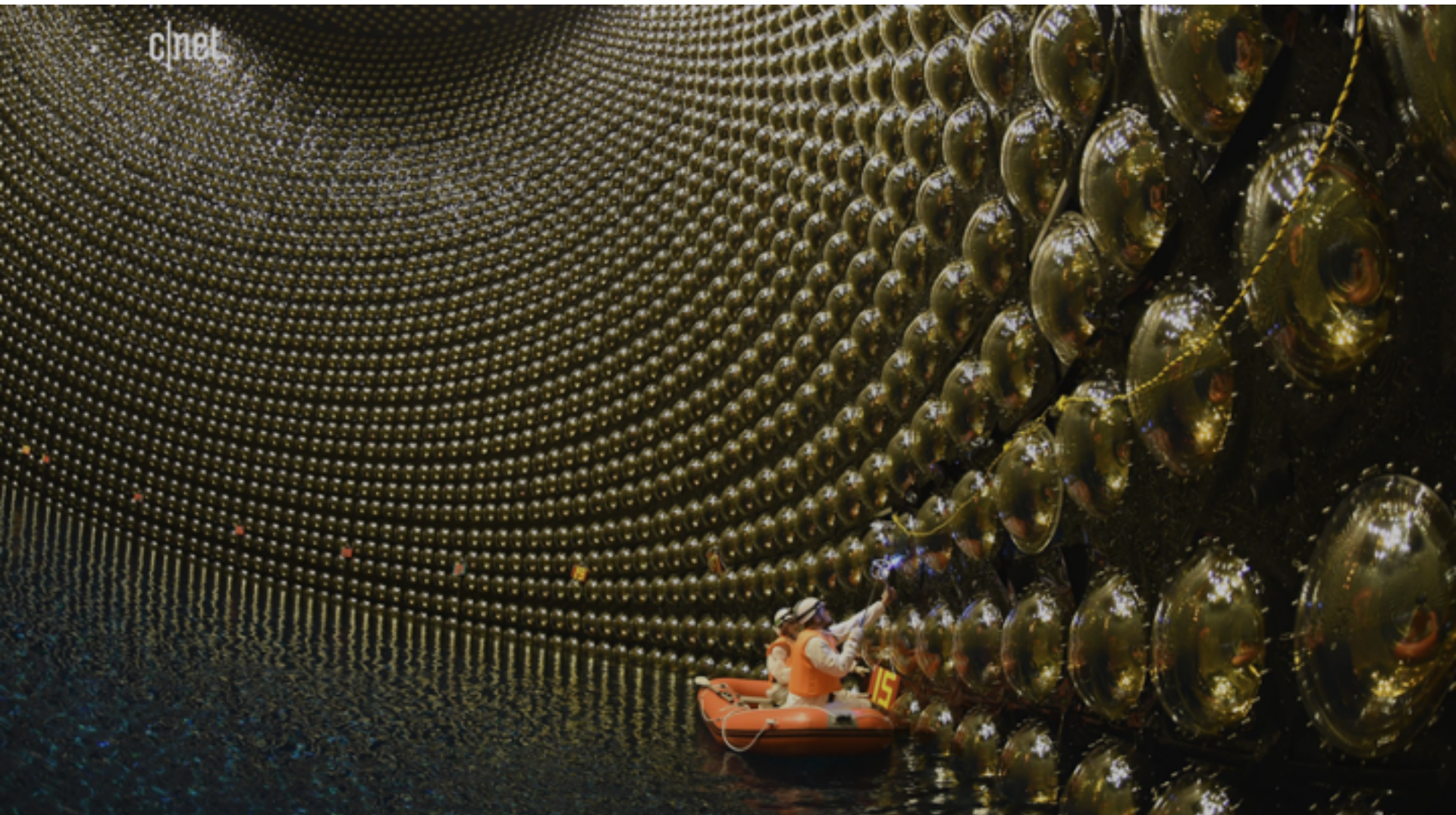
Réponse des photo-détecteurs
pour un événement typique



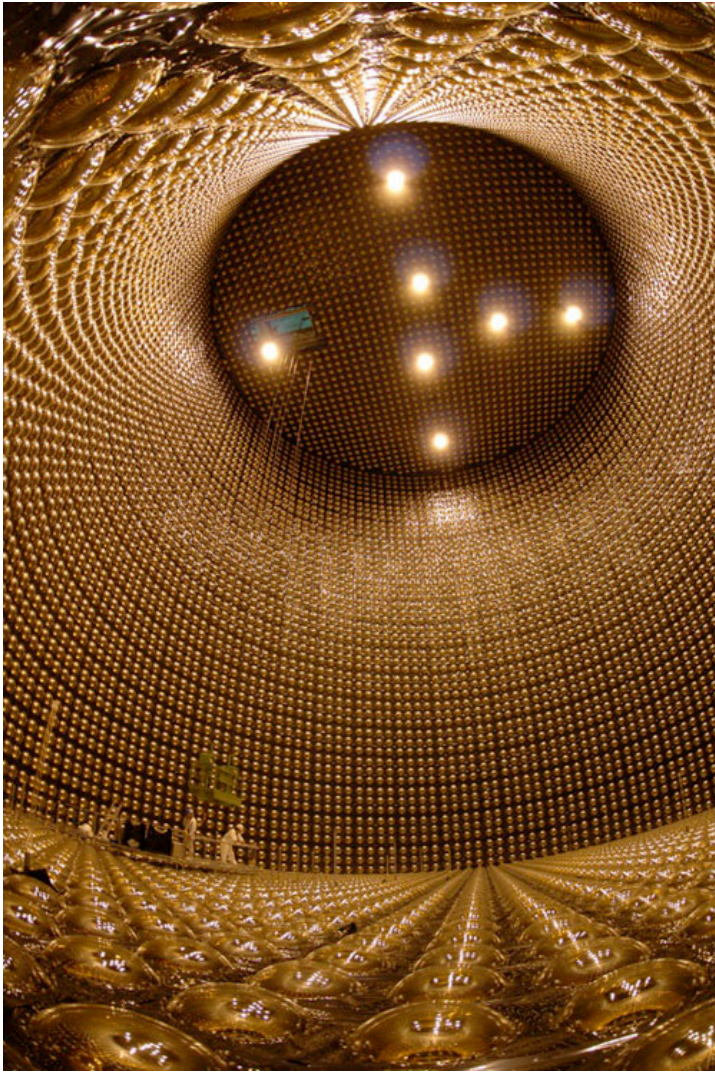
Expérience oscillation neutrinos K2K

tank cylindrique rempli d'eau (1k tonne) / (39.3 m diamètre - 41.4 m hauteur)

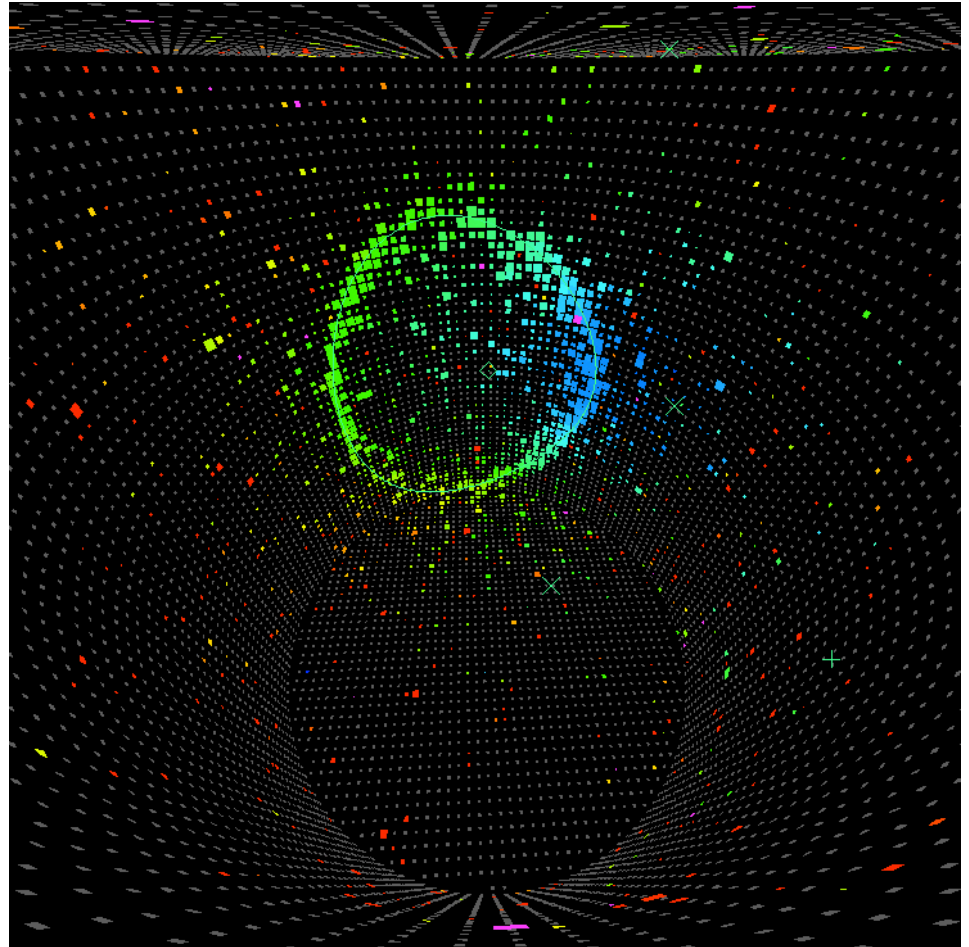
11000 tubes photomultiplicateurs



Expérience oscillation neutrinos K2K



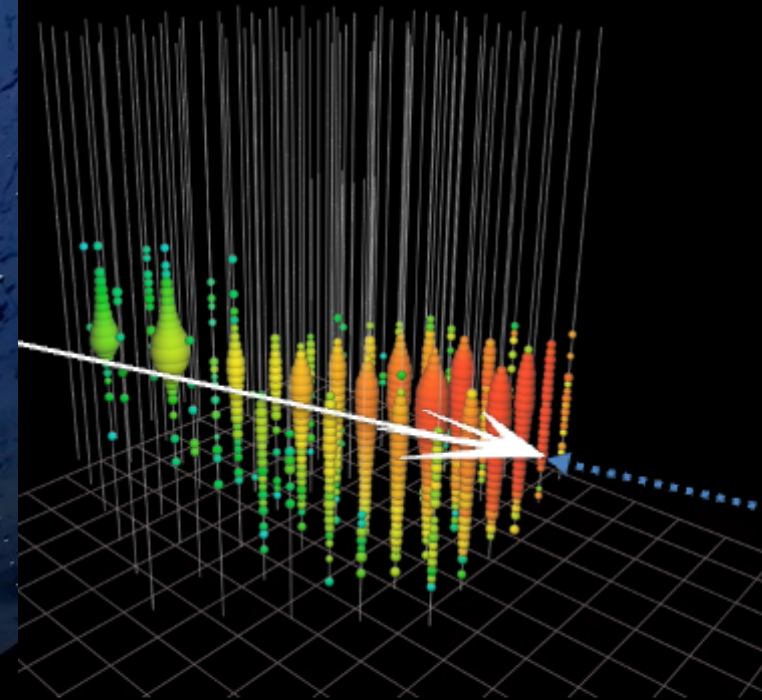
Mesures par effet Cherenkov

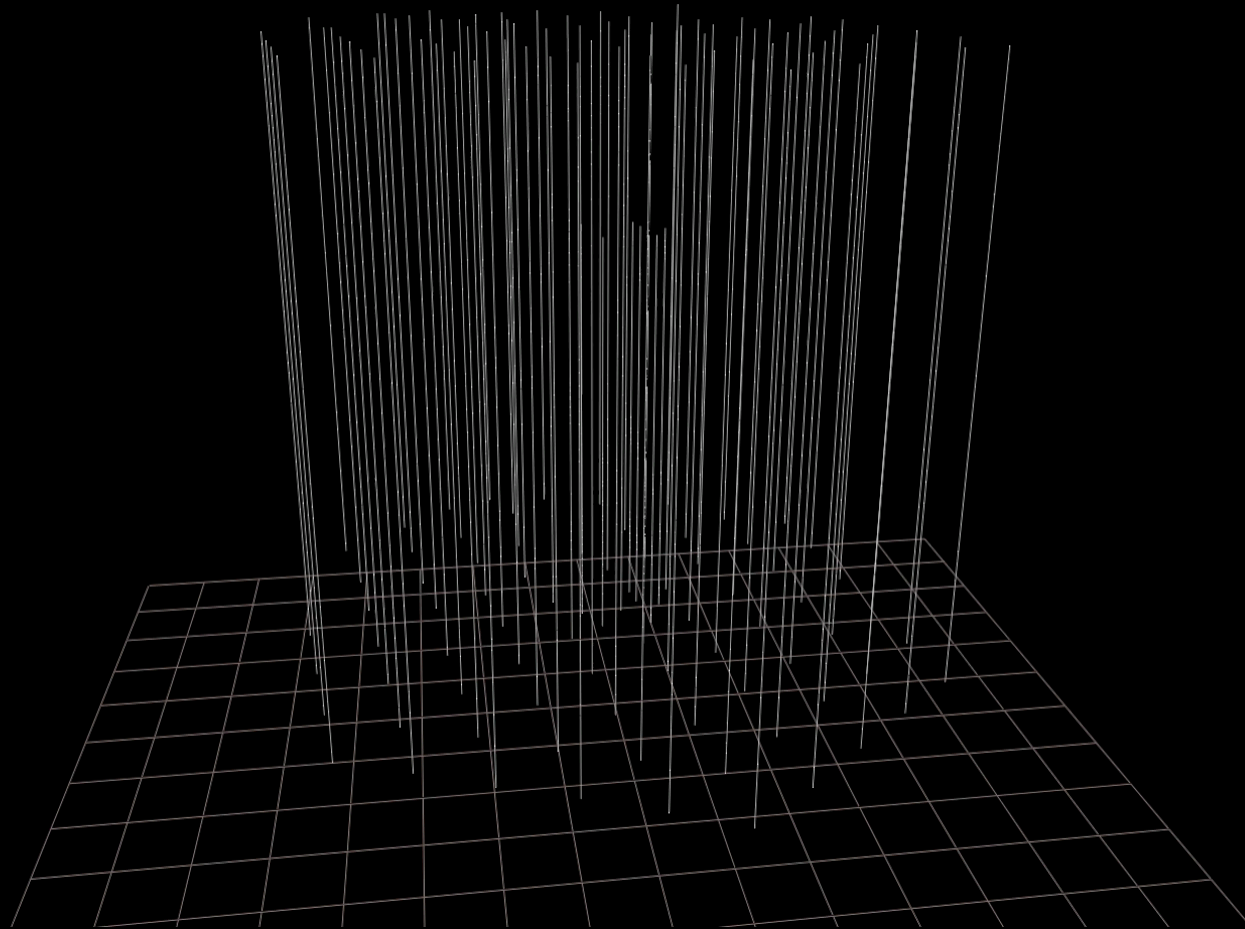


IceCube (Antarctique)

Mesures par effect Cherenkov

5160 spheres de PM dans 1 km³ de glace
entre 1.4 et 2.4 km de profondeur





- Un neutrino venant de traverser la Terre
- interagit dans la glace et donne un muon
- laissant 2600 TeV d'énergie dans le détecteur

