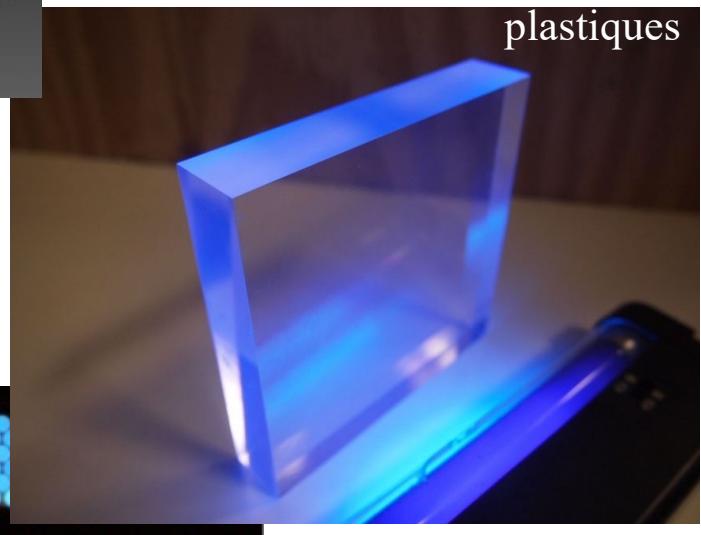
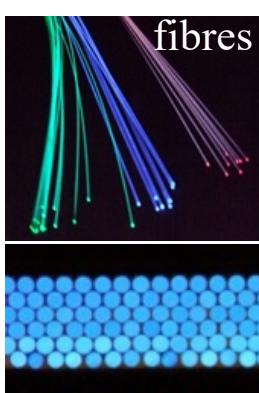
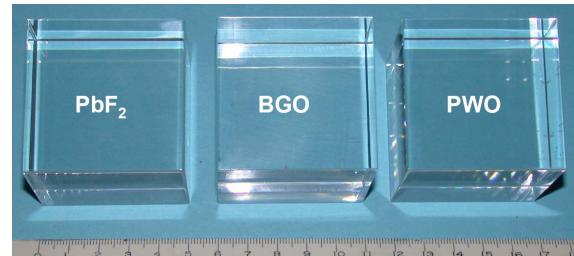
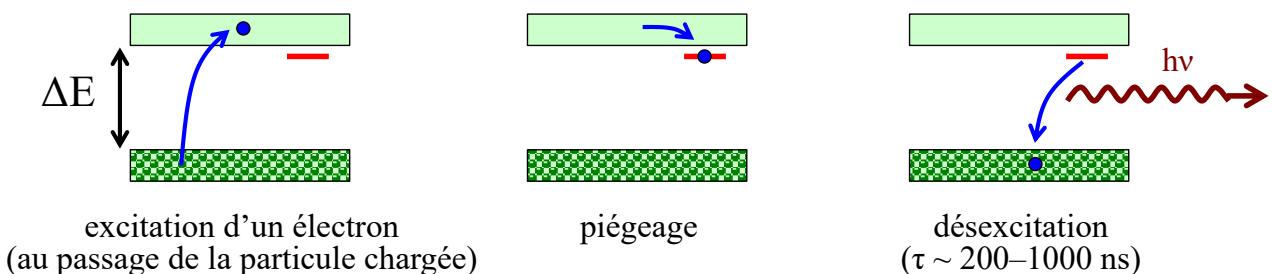
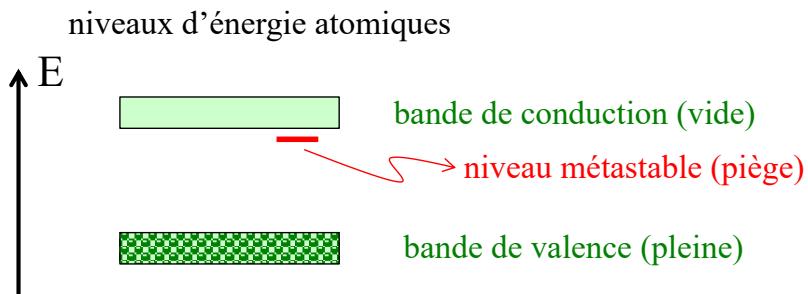


Scintillateurs



Cristaux scintillants (inorganiques)

- Exemples:
 - NaI(Tl)
 - CsI(Tl)
 - LiI(Eu)
 - BaF₂(Eu)

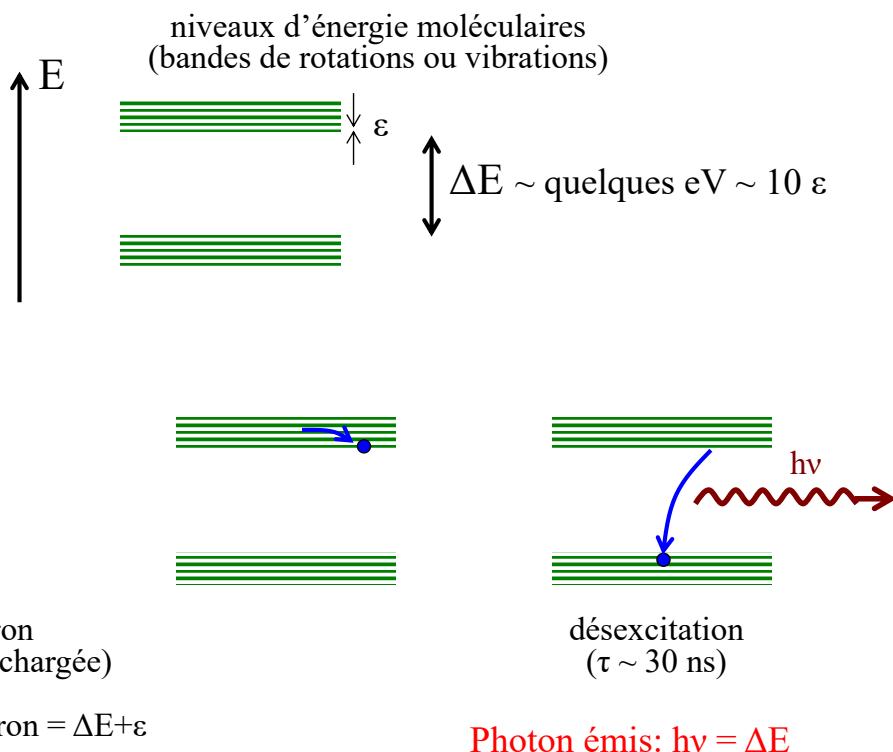


Photon émis: $h\nu < \Delta E \rightarrow$ ne peut pas être réabsorbé
 $h\nu \sim 3\text{ eV}$ pour NaI

Scintillateurs organiques

- Exemples:

- anthracène
- stilbène
- plastiques
- solutions organiques



Scintillateurs

Scintillateur	η (rel)	τ ns	λ nm
Anthracène	100	30	447
Plastic	NE 102	65	423
	NE 111	55	370
Liquide	NE 220	65	425
	NE 311	65	425
	NE 313	62	425
Cristaux	NaI(Tl)	230	413 → $h\nu = 3.0 \text{ eV}$
	CsI(Tl)	95	580
	BaF ₂ (Eu)	110	435
	BGO	35	480

organique

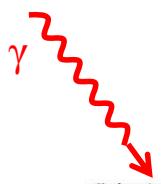
inorganique

η = rendement de scintillation

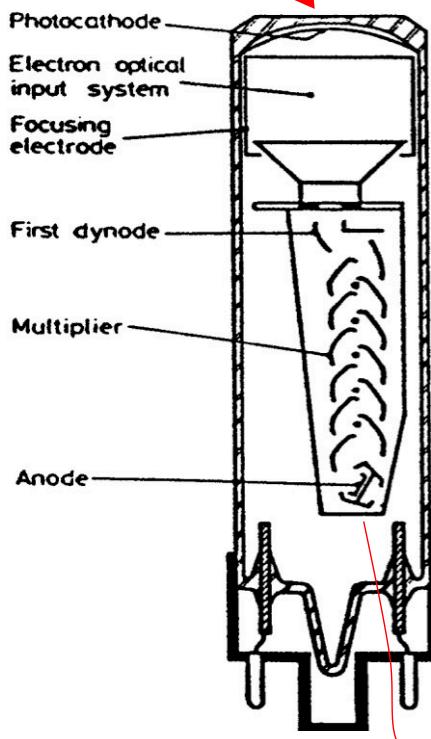
τ = durée de vie moyenne des niveaux excités

λ = longueur d'onde au maximum du spectre d'émission

$$E = pc = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 2\pi \frac{\hbar c}{\lambda} \quad \hbar c = 197 \text{ MeV fm} = 197 \text{ eV nm}$$



Photomultiplicateur



$\varepsilon = \text{efficacité quantique (15--25\%)}$

$\Delta V \sim 1 \text{ kV}$

$$q = \int_0^\infty i(t) dt = N^{\text{photons}} f \varepsilon G e$$

$f = \text{facteur de collection lumineuse}$

$G = \text{gain photomultiplicateur} \sim 10^7$

$$\text{courant } i(t) = q \exp(-t/\tau)/\tau$$

Détecteurs d'ionisation à gaz

- Condensateur cylindrique rempli d'un gaz isolant:

- champ électrique:

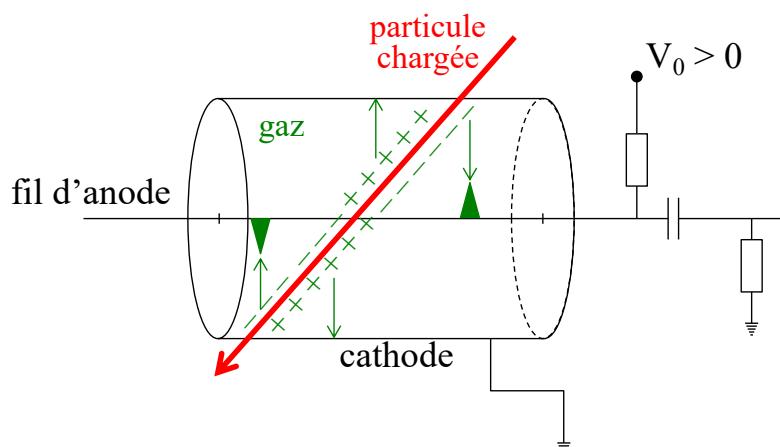
$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

$b = \text{diamètre tube}$
 $a = \text{diamètre fil}$

- mobilité des charges μ :

$$\vec{v}(r) = \mu \vec{E}(r)$$

$$\mu_{e^-} \sim 1000 \mu_{\text{ion}^+}$$

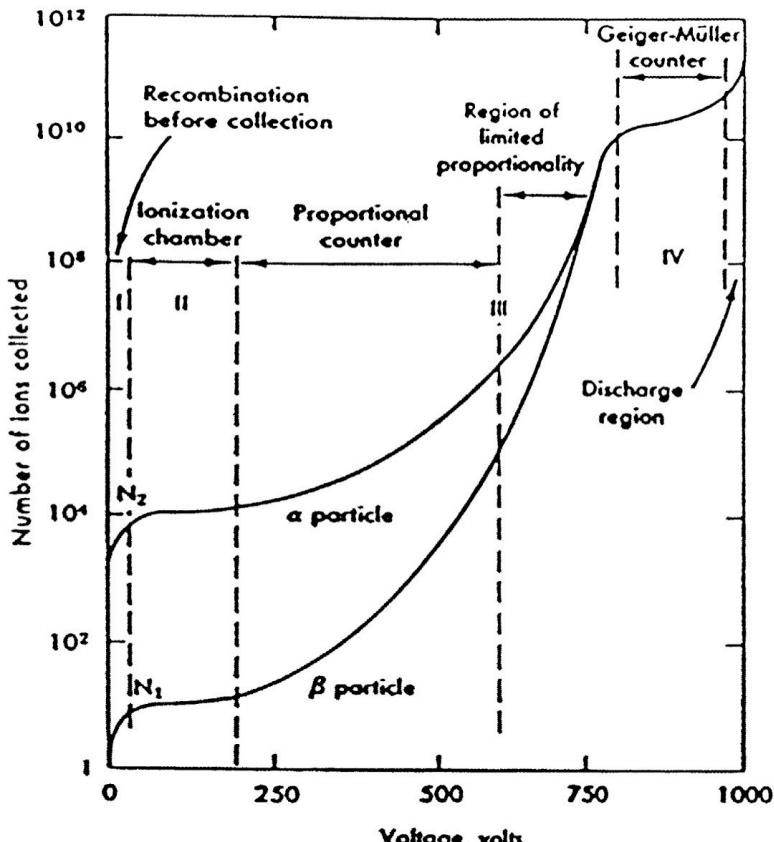


Au voisinage du fil d'anode,
multiplication des électrons par avalanche (▲)

DéTECTEURS D'IONISATION À GAZ

Modes opératoires

- I: recombinaison des charges
- II: chambre d'ionisation
- III: compteur proportionnel
- IV: compteur Geiger-Müller



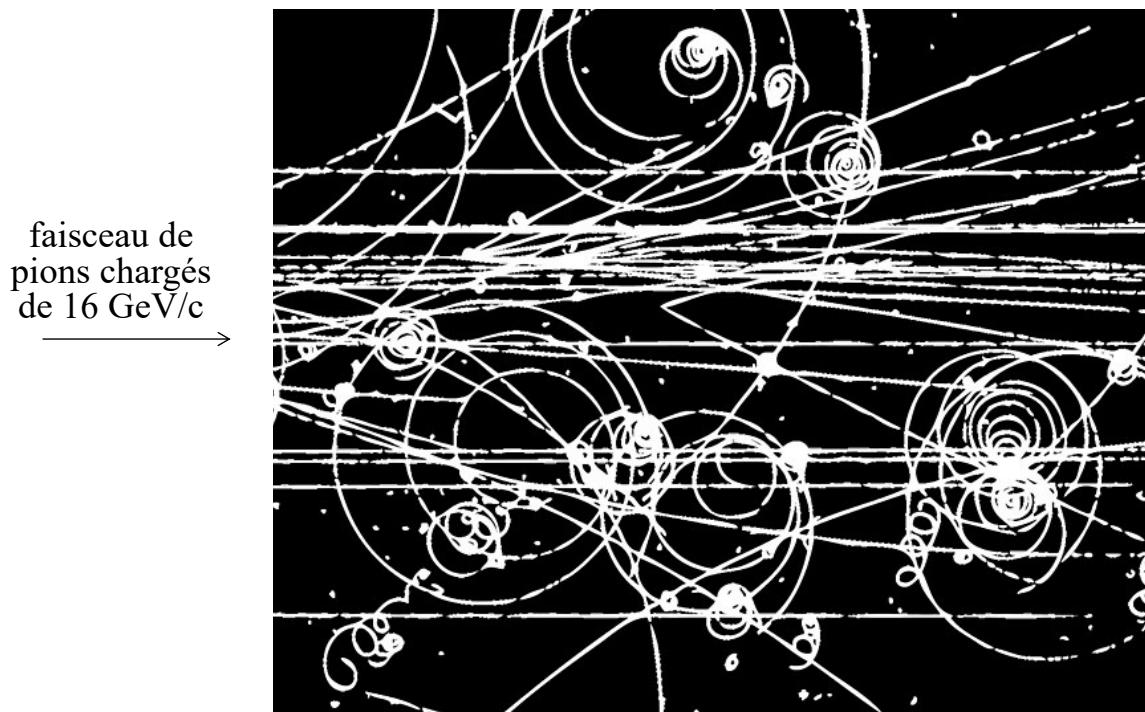
DÉTECTEURS À TRACES

- Anciens (technique photographique)
 - chambre à brouillard
 - chambre à bulles
 - émulsions
- Modernes (technique électronique)
 - chambre proportionnelle multifilaire (MWPC)
 - chambre à dérive
 - chambre à projection temporelle (TPC)
 - détecteur à microstrips (ou pixels) de Si
 - ...

... on en invente encore aujourd'hui

Photographie dans une chambres à bulles

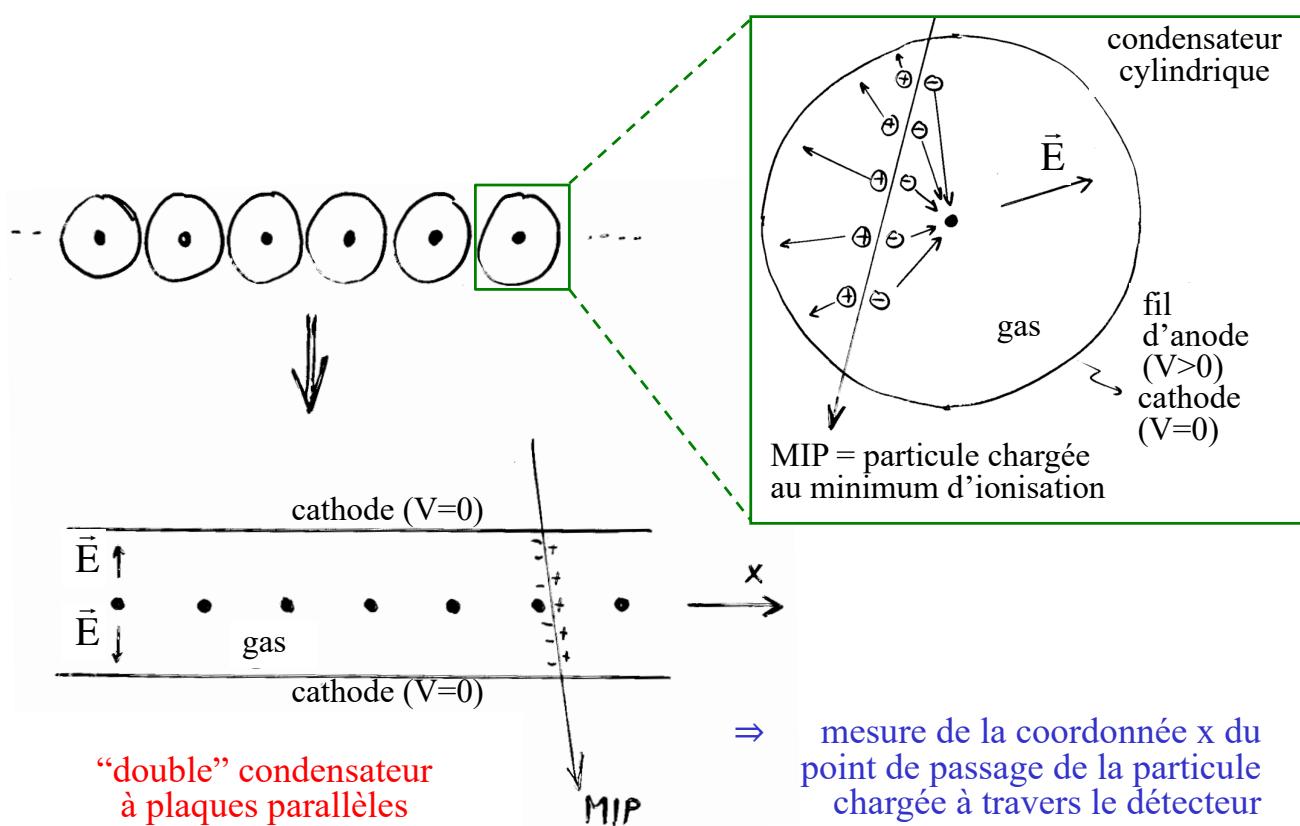
- Hydrogène liquide, $B = 1.5 \text{ T}$



OS, 2 avril 2025

83

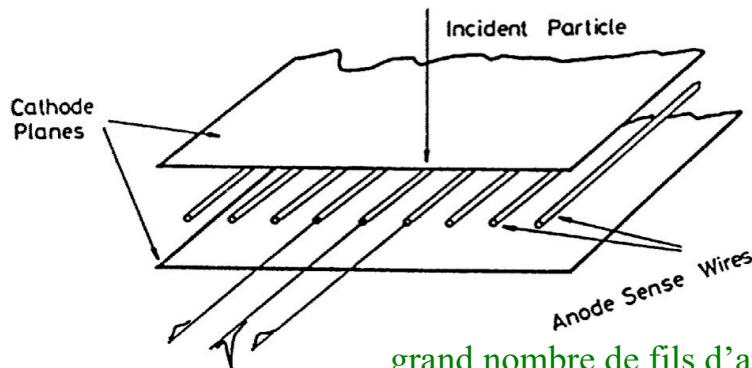
Chambre proportionnelle multifilaire



OS, 2 avril 2025

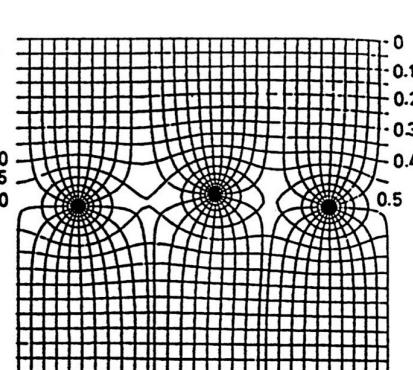
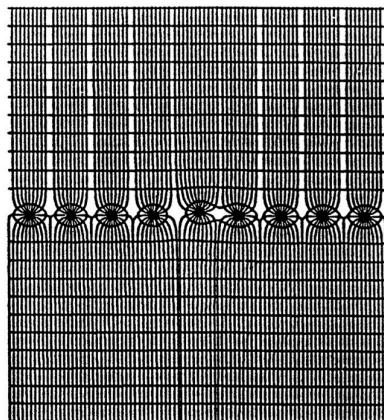
84

Chambre proportionnelle multifilaire



Invention de Georges Charpak (années 68–70)
→ prix Nobel en 1992

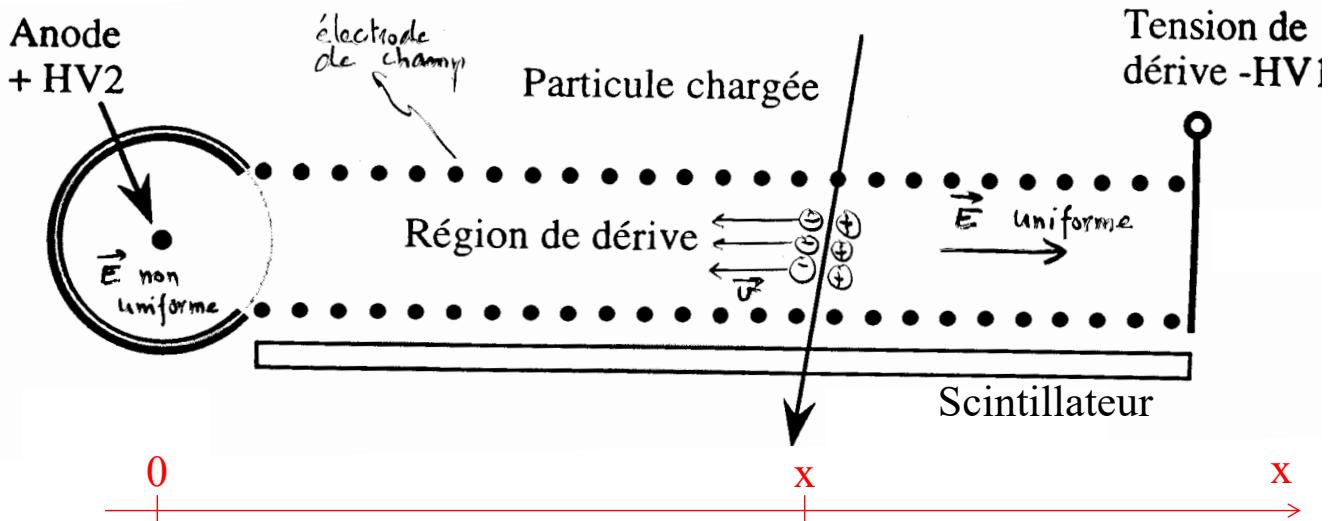
grand nombre de fils d'anode (canaux)
→ lecture électronique des signaux



champ électrique
~uniforme, sauf au
voisinage des fils
d'anode où $E \sim 1/r$

lignes de champ électrique et equipotentielles

Chambre à dérive



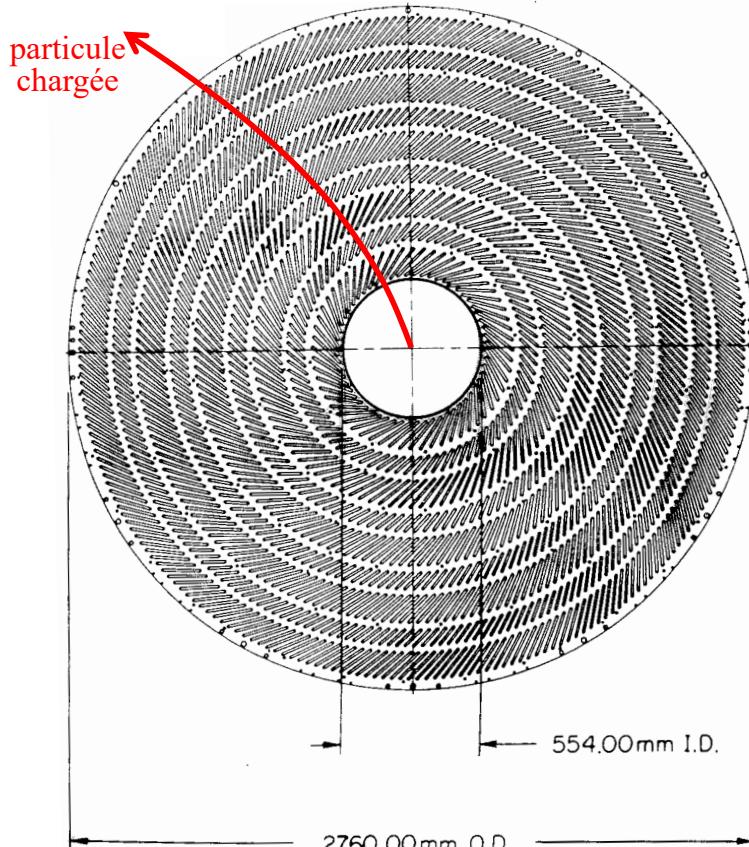
détection
sur l'anode
à $t=\Delta t$ en $x=0$

détection
à $t=0$ en x

$$x = v\Delta t$$

v = vitesse de dérive des électrons (~constante)

Chambre à dérive de CDF



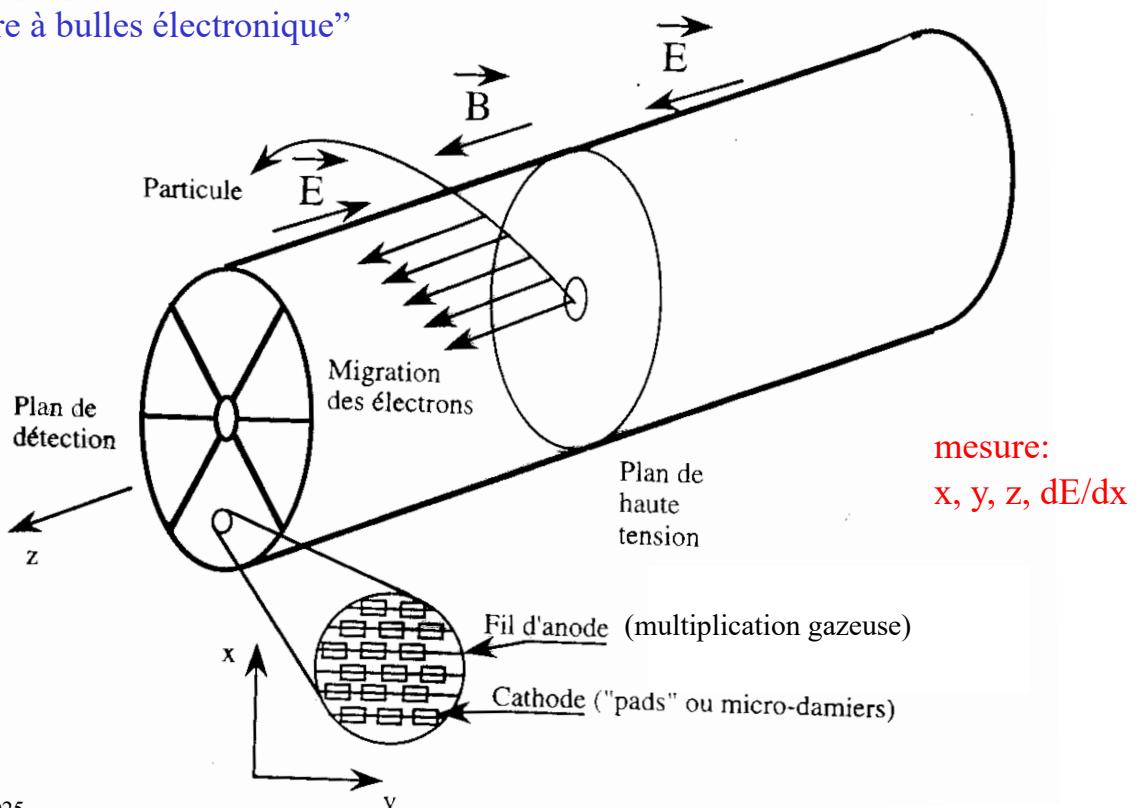
CDF = Collider
Detector
at Fermilab
(~1988–2011)

OS, 2 avril 2025

87

Chambre à projection temporelle

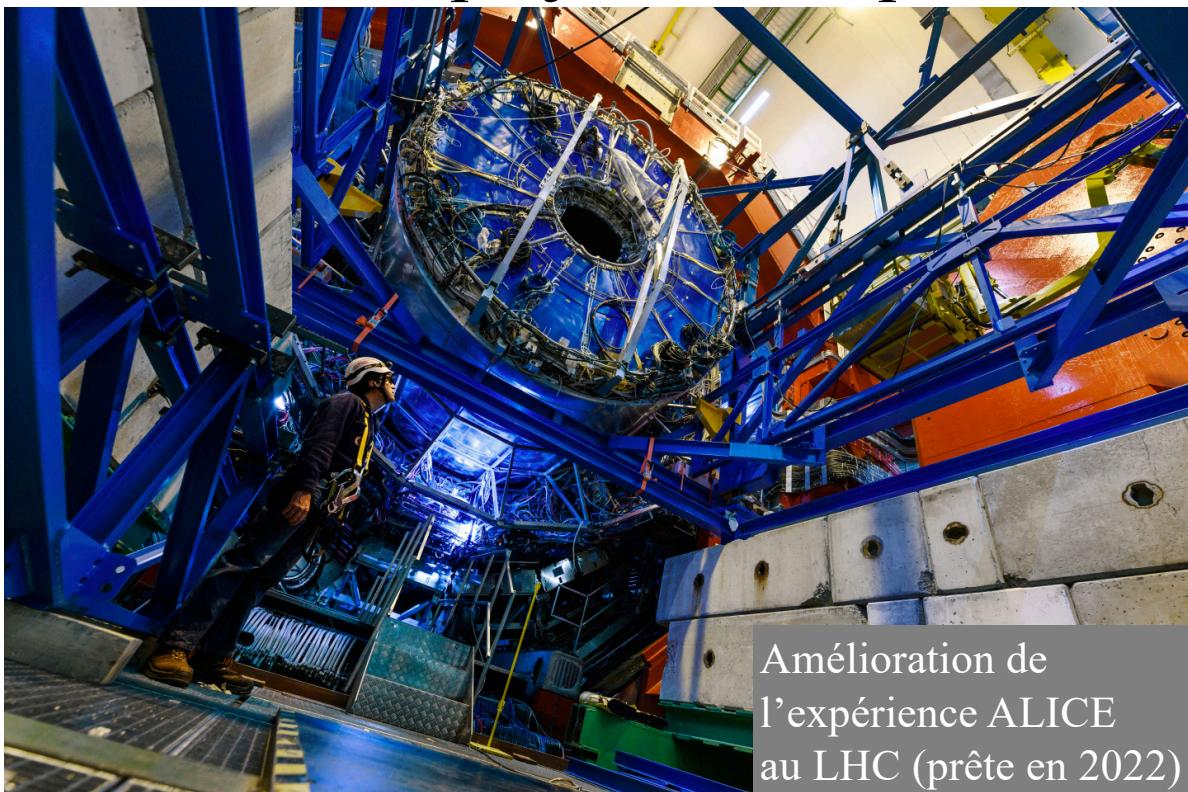
chambre proportionnelle multifilaire + chambre à dérive:
“chambre à bulles électronique”



OS, 2 avril 2025

88

Chambre à projection temporelle



TPC = Time Projection Chamber

OS, 2 avril 2025

89

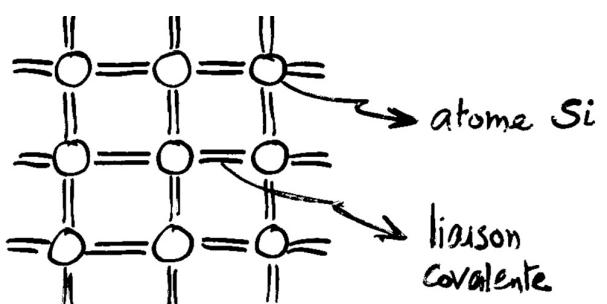
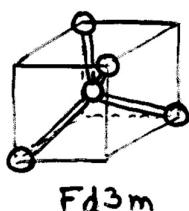
Semi-conducteurs

Intrinsèque (= pur)

Type I

- par exemple Si, Ge
- atomes tétravalents

Réseau cristallin



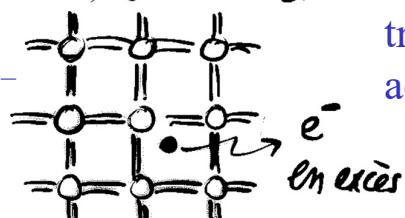
Porteurs de charge libres
(même pour le type I, qui est toujours légèrement de type N)

Extrinsèque (= dopé)

Type N

- dopant (P, As, ...)

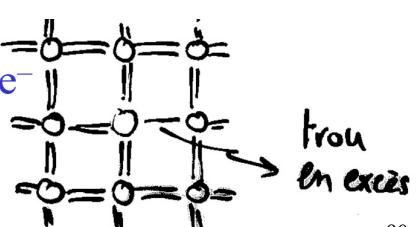
pentavalent
donneur d' e^-



Type P

- dopant (B, Al, Ga, ...)

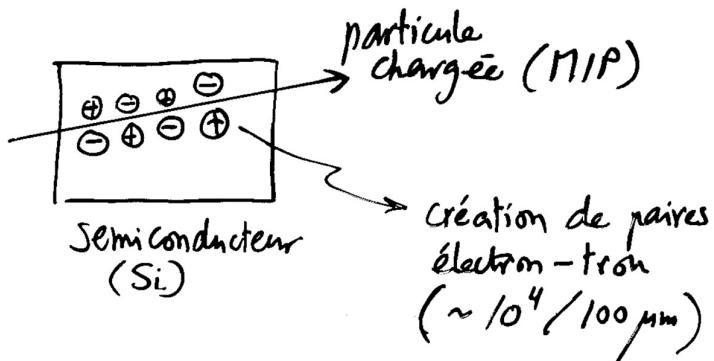
trivalent
accepteur d' e^-



OS, 2 avril 2025

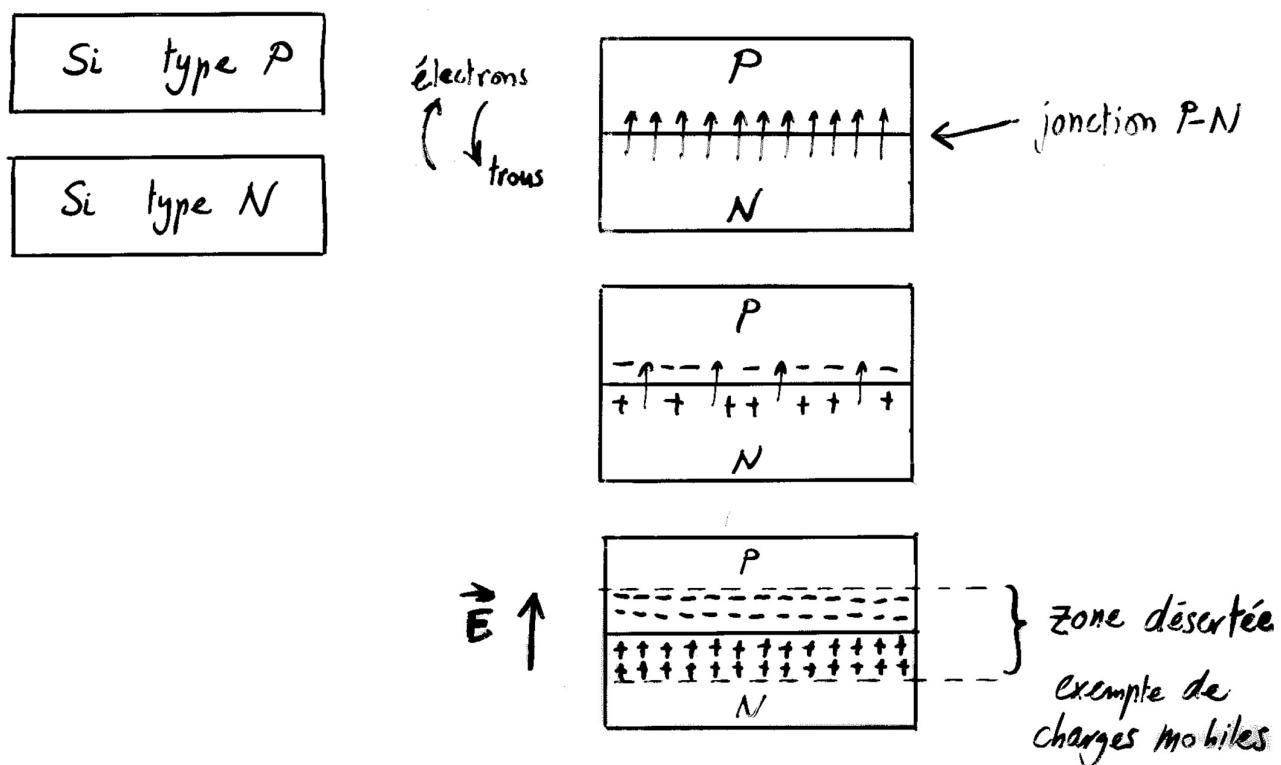
90

Détecteur à semi-conducteur



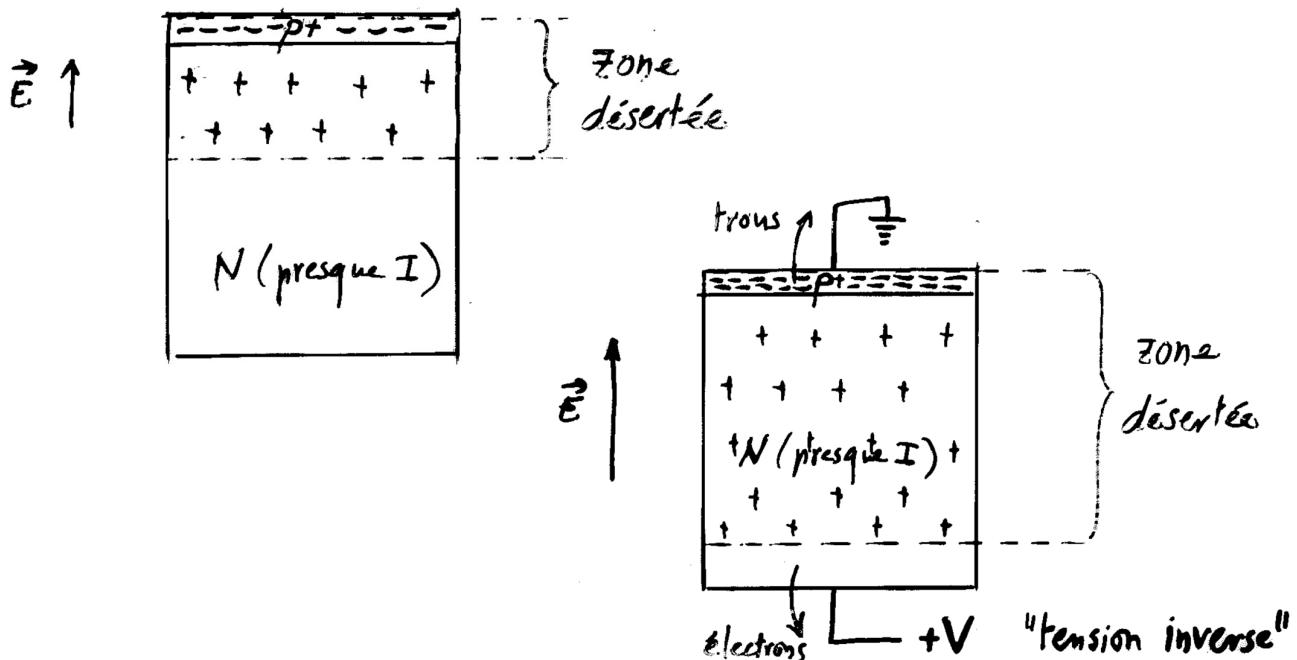
- Avantages sur les détecteurs à gaz:
 - plus compact, pas besoin de haute tension ni de bonbonnes de gaz
 - meilleure résolution
 - Energie pour créer une paire électron-trou (3.6 eV dans le Si) bien plus petite que celle pour ioniser un gaz (15–30 eV dans Ar)
- Mais ... un semi-conducteur n'est pas isolant !
 - il contient des porteurs de charge libres
 - on ne peut pas simplement remplacer le gaz isolant par du silicium

Jonction P-N



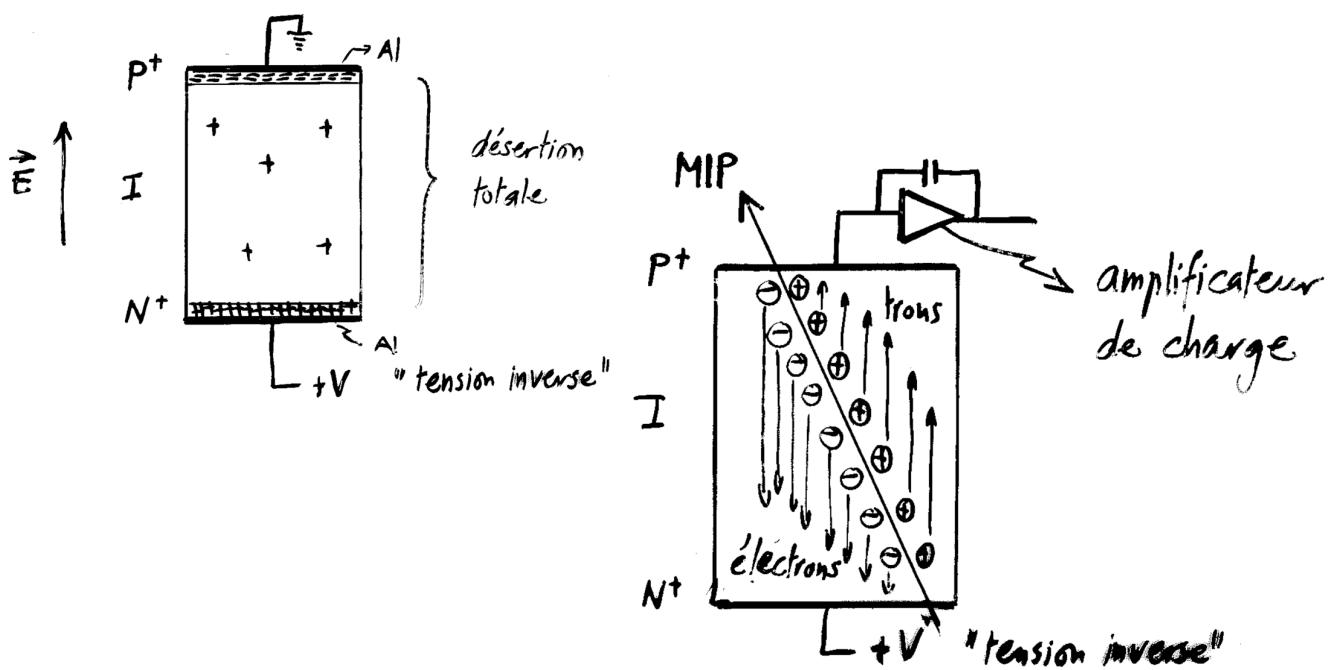
Jonction P–N

- Cristal de Si de haute résistivité (presque type I, légèrement N)
- Sur une face: dopage P très fort (P+) par implantation d'ions

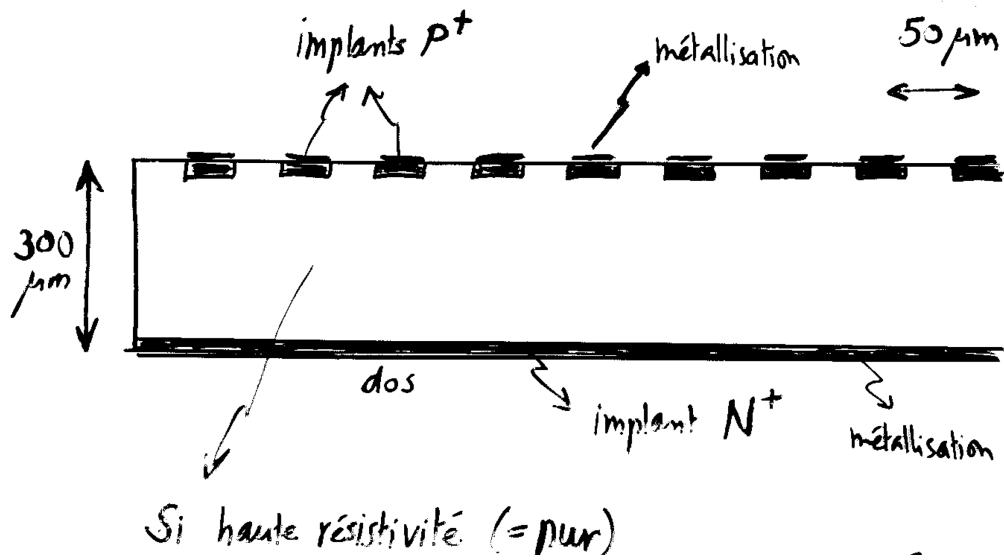


Diode PIN

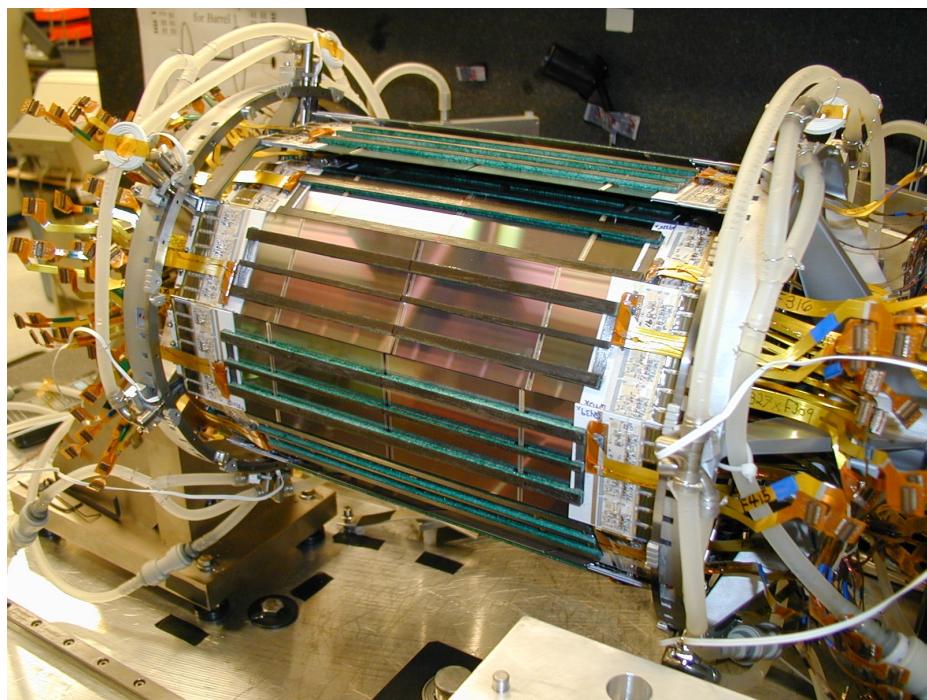
- Jonction P–N avec fort dopage N sur l'autre face (N^+)
- Métallisation des deux faces (contact ohmique)



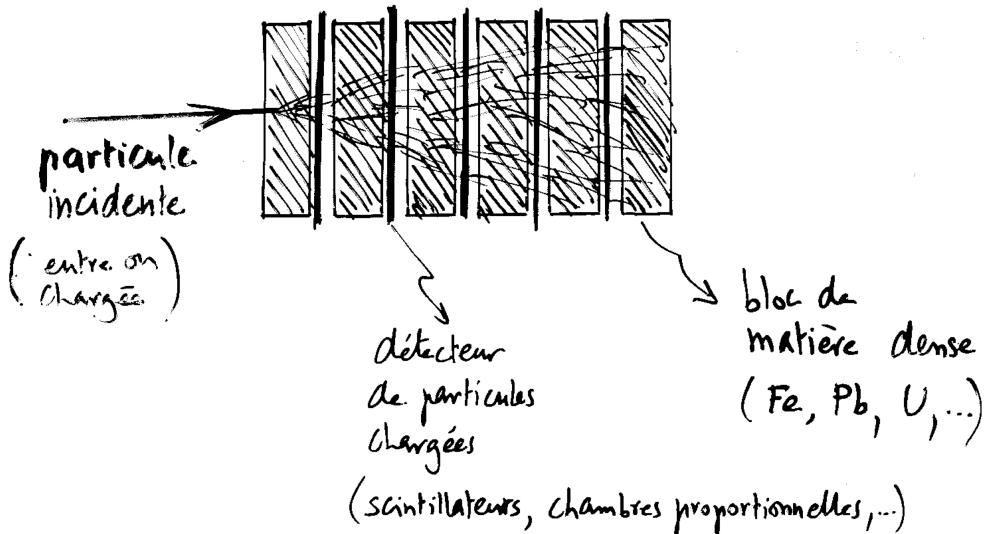
Détecteur Si à micro-bandes



Détecteur de vertex de CDF



Calorimètres

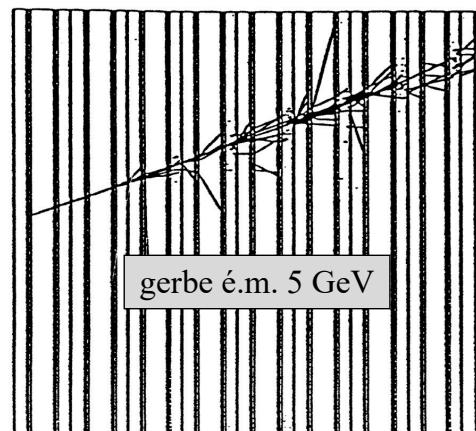


- Un bon calorimètre doit être assez épais pour stopper la particule incidente et contenir toute la gerbe
- **Mesures:** énergie déposée par la particule, position de la gerbe, forme de la gerbe (profondeur, extension latérale)

Calorimètres

• Calorimètre électromagnétique

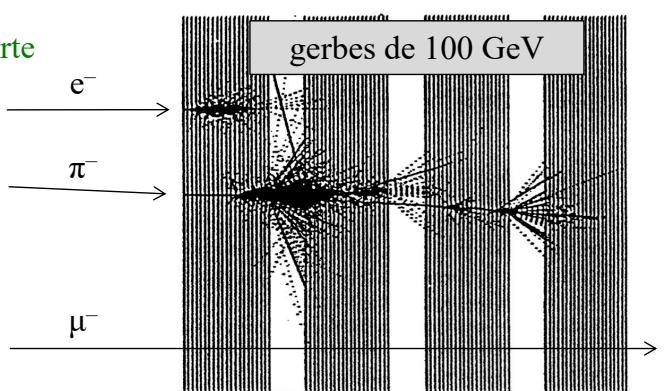
- détection de photons, électrons, positons qui forment des gerbes électromagnétiques
- également $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- épaisseur $> 20 X_0$
(X_0 = longueur de rayonnement)



• Calorimètre hadronique

pour des hadrons de haute énergie ($> 5 \text{ GeV}$) dans la matière:
interactions é.m. << interaction forte

- détection de hadrons (protons, neutrons, pions, ...) qui forment des gerbes hadroniques + gerbes é.m. initiées par les π^0
- épaisseur $> 5 \lambda$
(λ = longueur d'absorption nucléaire $\sim 1/\sigma_{\text{abs}}$)

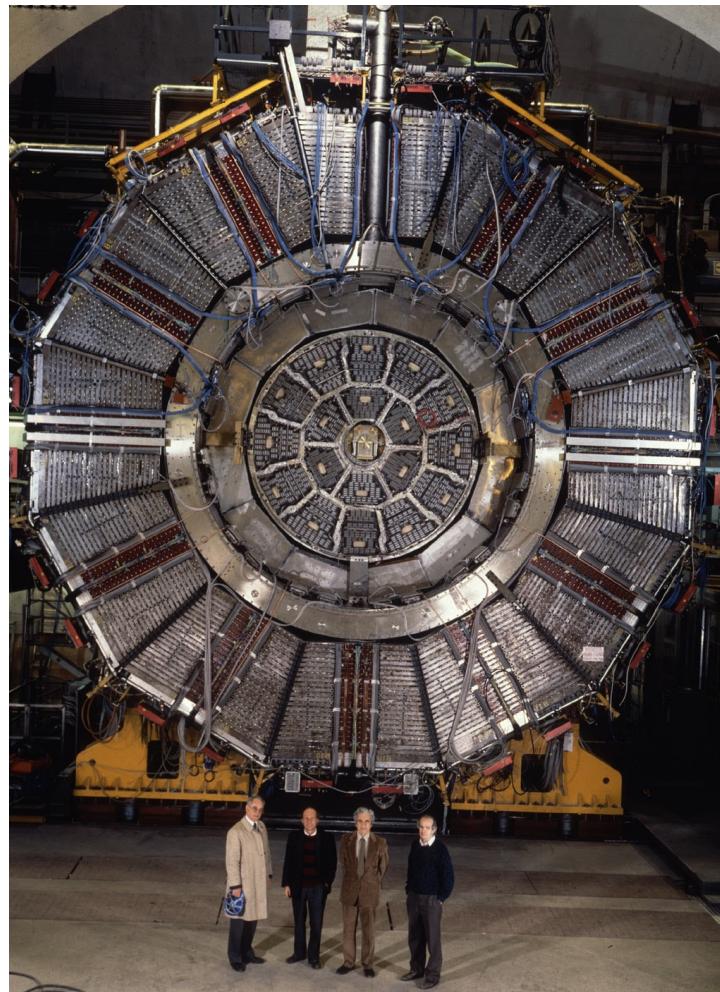


Détecteur ALEPH

Expérience ALEPH
au LEP (1989–2000)

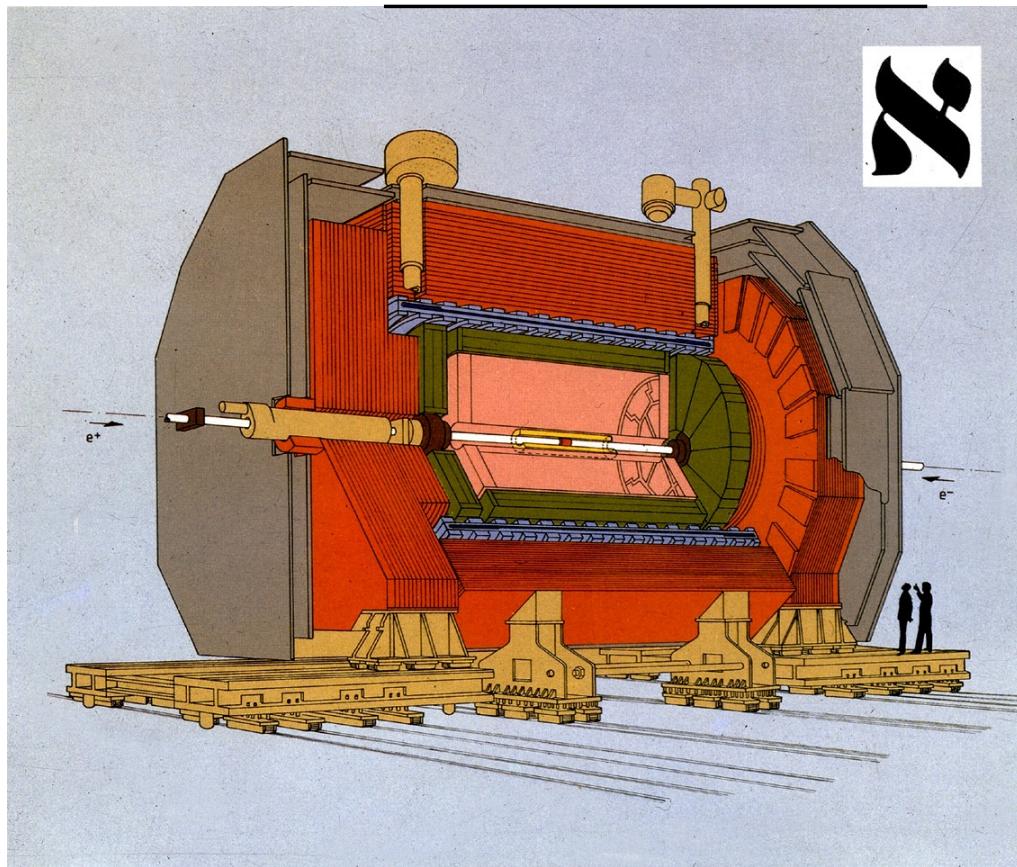
Etude collisions e^+e^-
à $\sqrt{s} = 90\text{--}209 \text{ GeV}$

OS, 2 avril 2025



99

Détecteur ALEPH

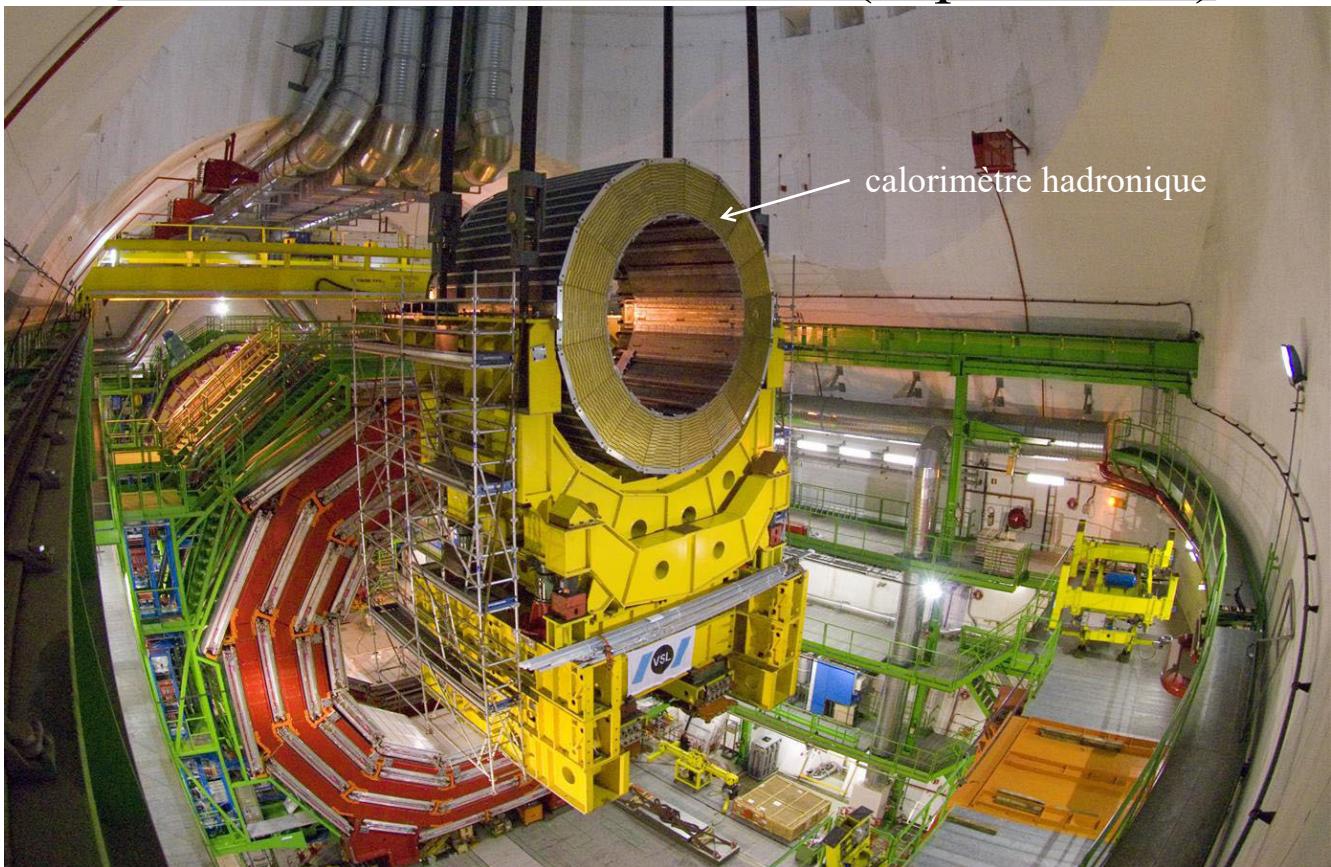


OS, 2 avril 2025

Luminosity
Monitors

100

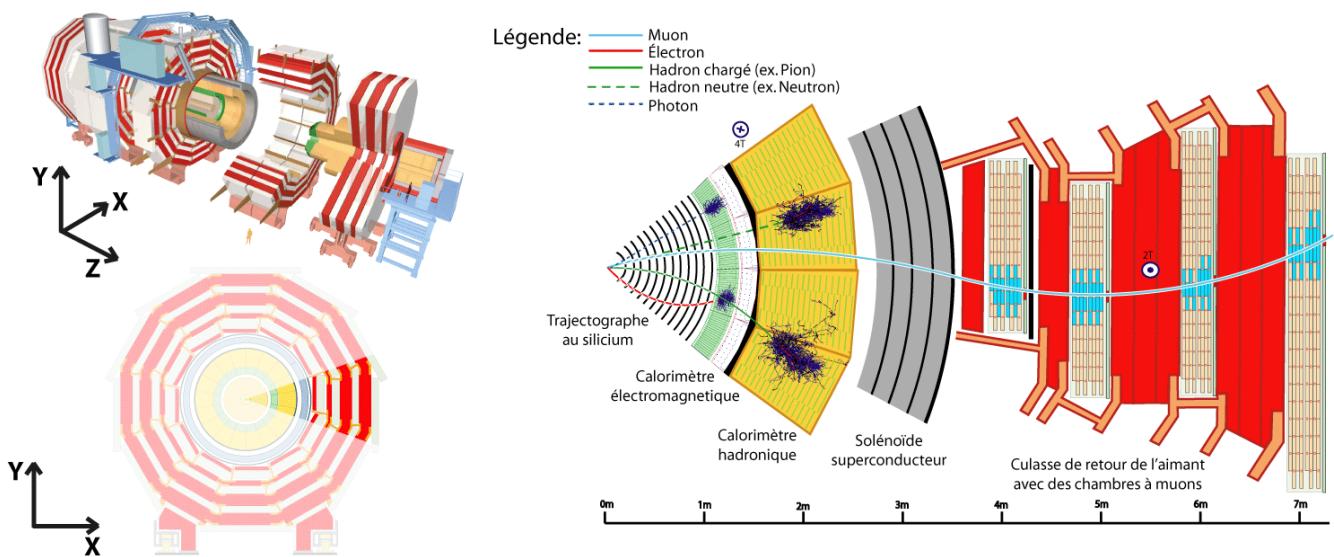
Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)



OS, 2 avril 2025

101

Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)



OS, 2 avril 2025

102

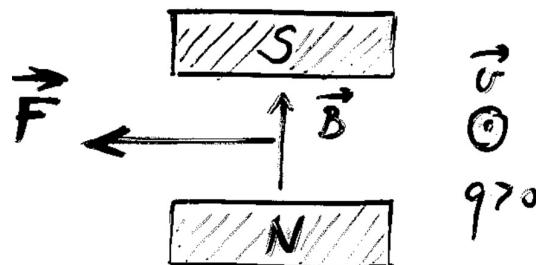
Chapitre 4: Accélérateurs

- Il faut des faisceaux de plus en plus énergétiques et intenses pour:
 - sonder la matière sur des distances de plus en plus petites ($\lambda = h/p$)
 - produire de nouvelles particules massives (réelles)
 - explorer des phénomènes rares (avec des sections efficaces très petites)
- Il faut donc des accélérateurs:
 - l'Univers (rayons cosmiques): intensité limitée à (très) haute énergie
 - accélérateurs terrestres: énergie limitée (technologie, coût, ...)
- Seules les particules chargées "stables" peuvent être accélérées:
 - e^- , e^+ , p , \bar{p} , ions, muons μ^\pm ($\tau \sim 2 \mu s$)
- Composantes d'un accélérateur**
 - source de particules chargées
 - accélération (par des **champs électriques**)
 - tube à vide
 - guidage et stockage des faisceaux (par des **champs magnétiques**)

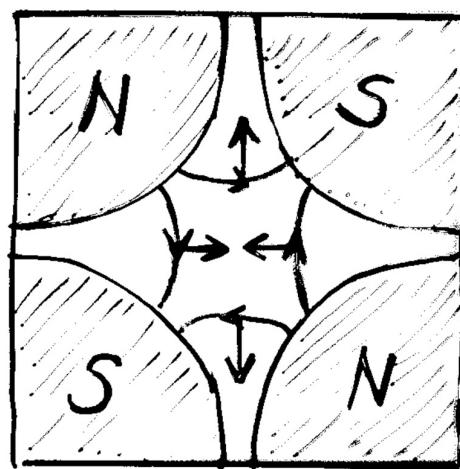
Guidage des faisceaux

Force de Lorentz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

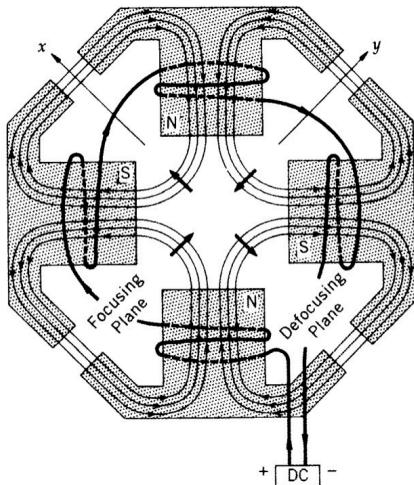
- Déflection**
 - aimants dipolaires
 - tout le faisceau dévié dans la même direction



- Focalisation**
 - aimants quadrupolaires
 - focalisation dans un plan transverse, défocalisation dans l'autre
 - Note: un doublet de quadrupôles focalise dans les deux plans



Aimant quadrupolaire



Double quadrupôle pour les 2 faisceaux du LHC

