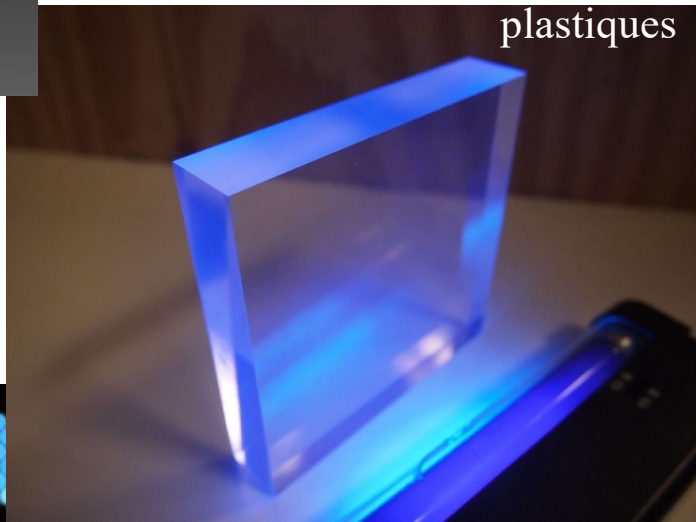
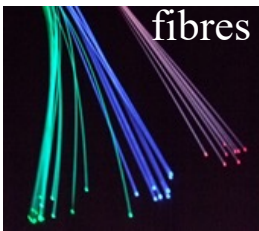
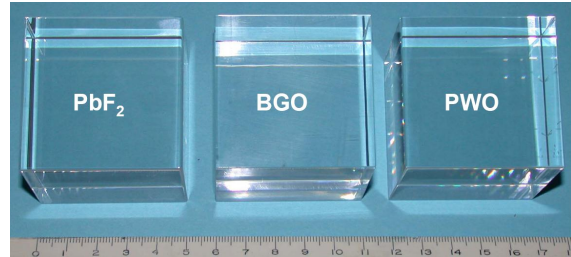


# Scintillateurs



OS, 2 avril 2025

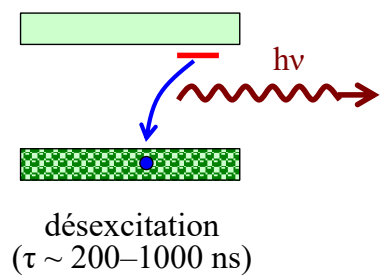
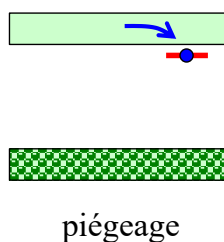
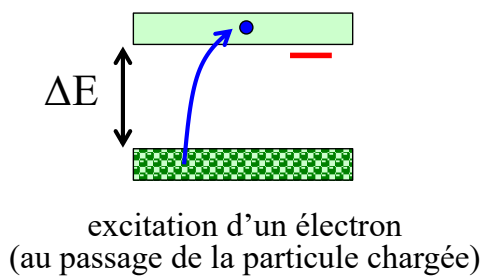
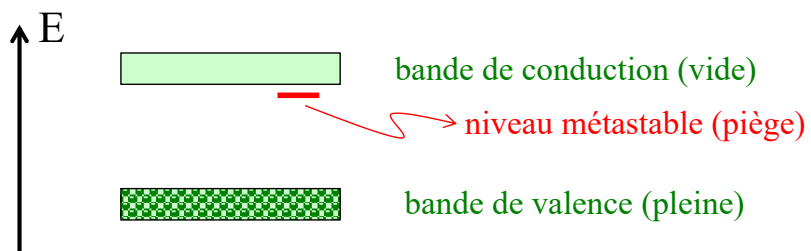
75

## Cristaux scintillants (inorganiques)

### Exemples:

- NaI(Tl)
- CsI(Tl)
- LiI(Eu)
- BaF<sub>2</sub>(Eu)

niveaux d'énergie atomiques



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

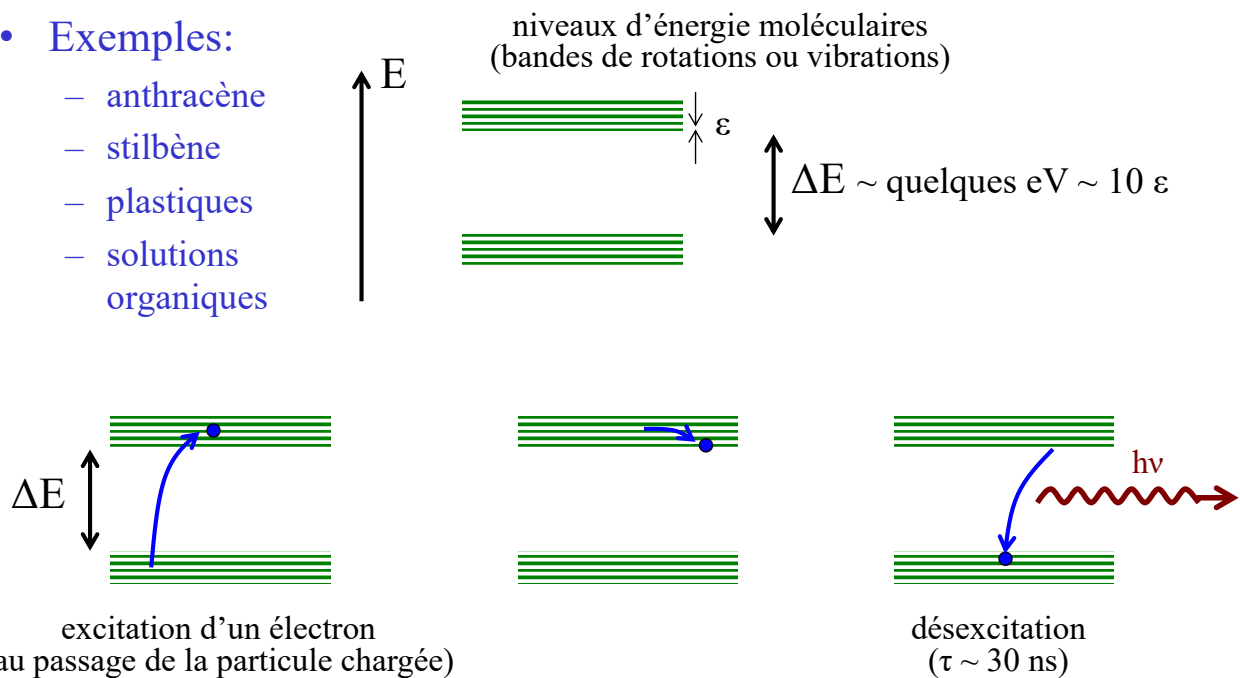
OS, 2 avril 2025

76

# Scintillateurs organiques

- Exemples:

- anthracène
- stilbène
- plastiques
- solutions organiques



excitation d'un électron  
(au passage de la particule chargée)

→ énergie transmise à l'électron =  $\Delta E + \epsilon$

Photon émis:  $h\nu = \Delta E$

OS, 2 avril 2025

77

# Scintillateurs

Scintillateur		$\eta$ (rel)	$\tau$ ns	$\lambda$ nm	$\eta$ = rendement de scintillation $\tau$ = durée de vie moyenne des niveaux excités $\lambda$ = longueur d'onde au maximum du spectre d'émission
organique	Anthracène	100	30	447	
	Plastic NE 102	65	2.4	423	
	NE 111	55	1.6	370	
	Liquide NE 220	65	3.8	425	
	NE 311	65	3.8	425	
inorganique	NE 313	62	4.0	425	
	Cristaux NaI(Tl)	230	230	413	→ $h\nu = 3.0 \text{ eV}$
	CsI(Tl)	95	1100	580	
	BaF <sub>2</sub> (Eu)	110	1000	435	
	BGO	35	300	480	

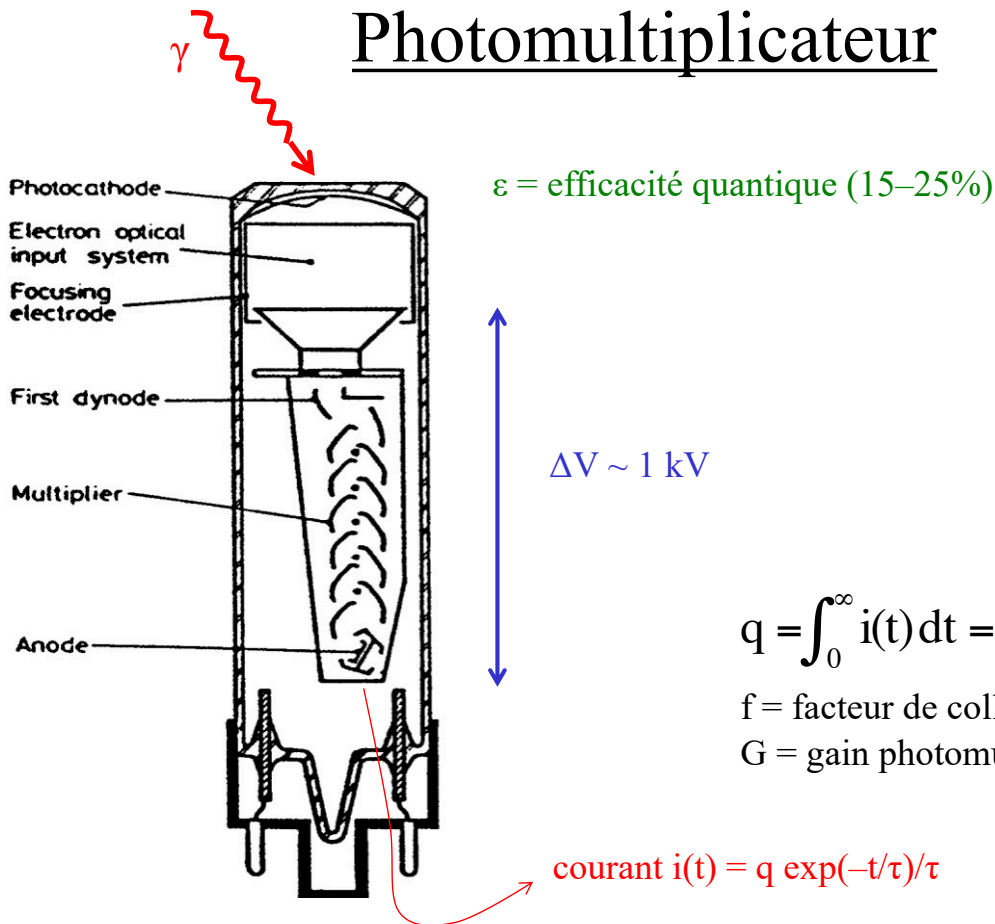
$$E = pc = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 2\pi \frac{\hbar c}{\lambda}$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm} = 197 \text{ eV nm}$$

OS, 2 avril 2025

78

# Photomultiplicateur



OS, 2 avril 2025

79

## Détecteurs d'ionisation à gaz

- Condensateur cylindrique rempli d'un gaz isolant:

- champ électrique:

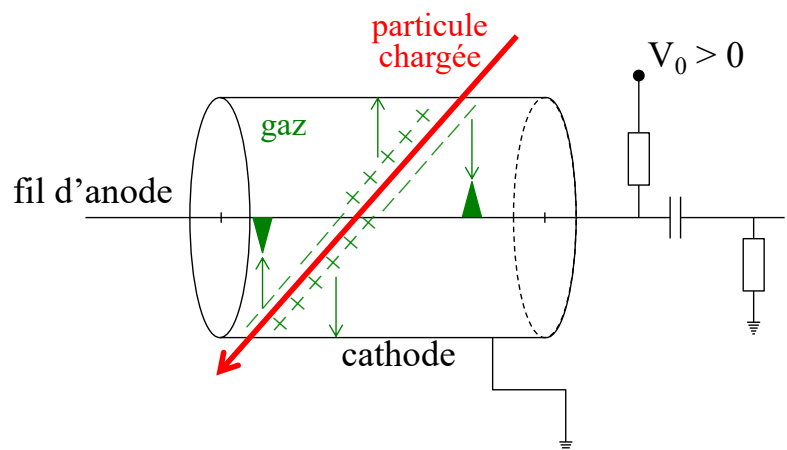
$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

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

- mobilité des charges  $\mu$ :

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

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



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

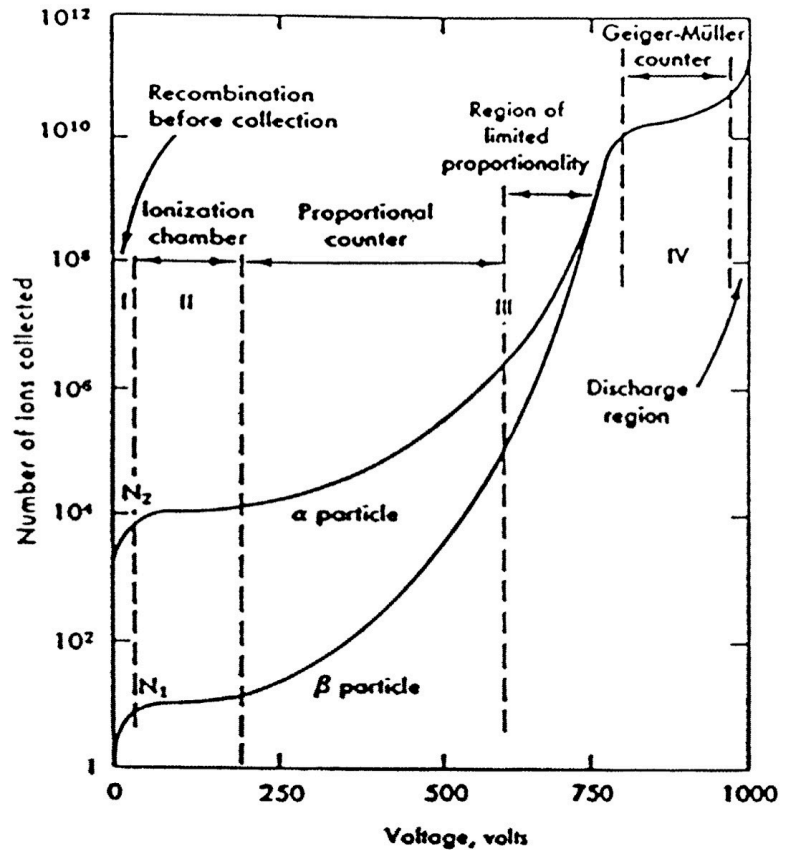
OS, 2 avril 2025

80

# Détecteurs d'ionisation à gaz

## Modes opératoires

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



OS, 2 avril 2025

81

## Détecteurs à traces

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

... on en invente encore aujourd'hui

OS, 2 avril 2025

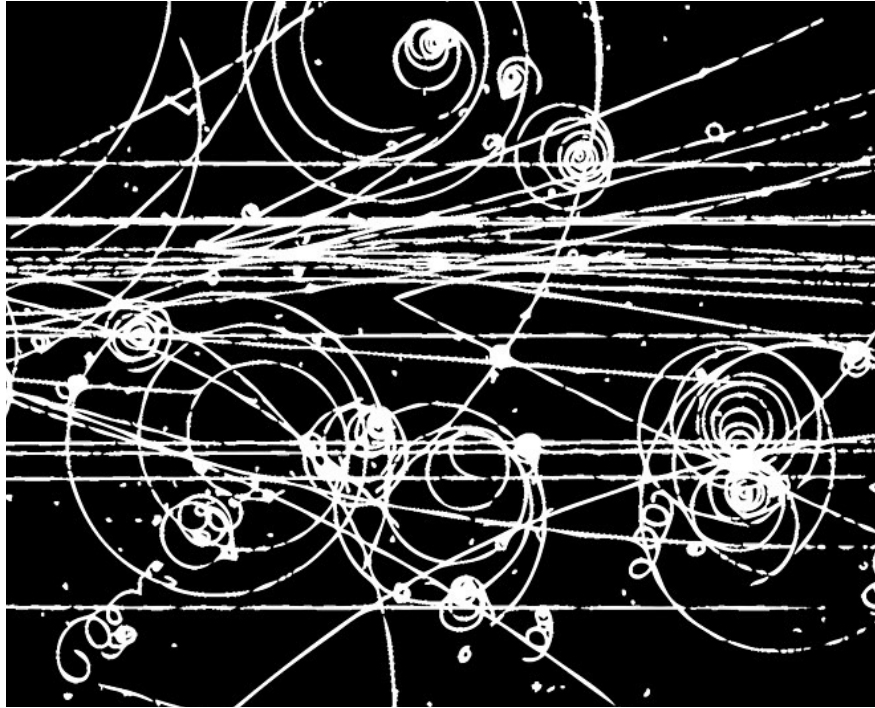
82



# Photographie dans une chambre à bulles

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

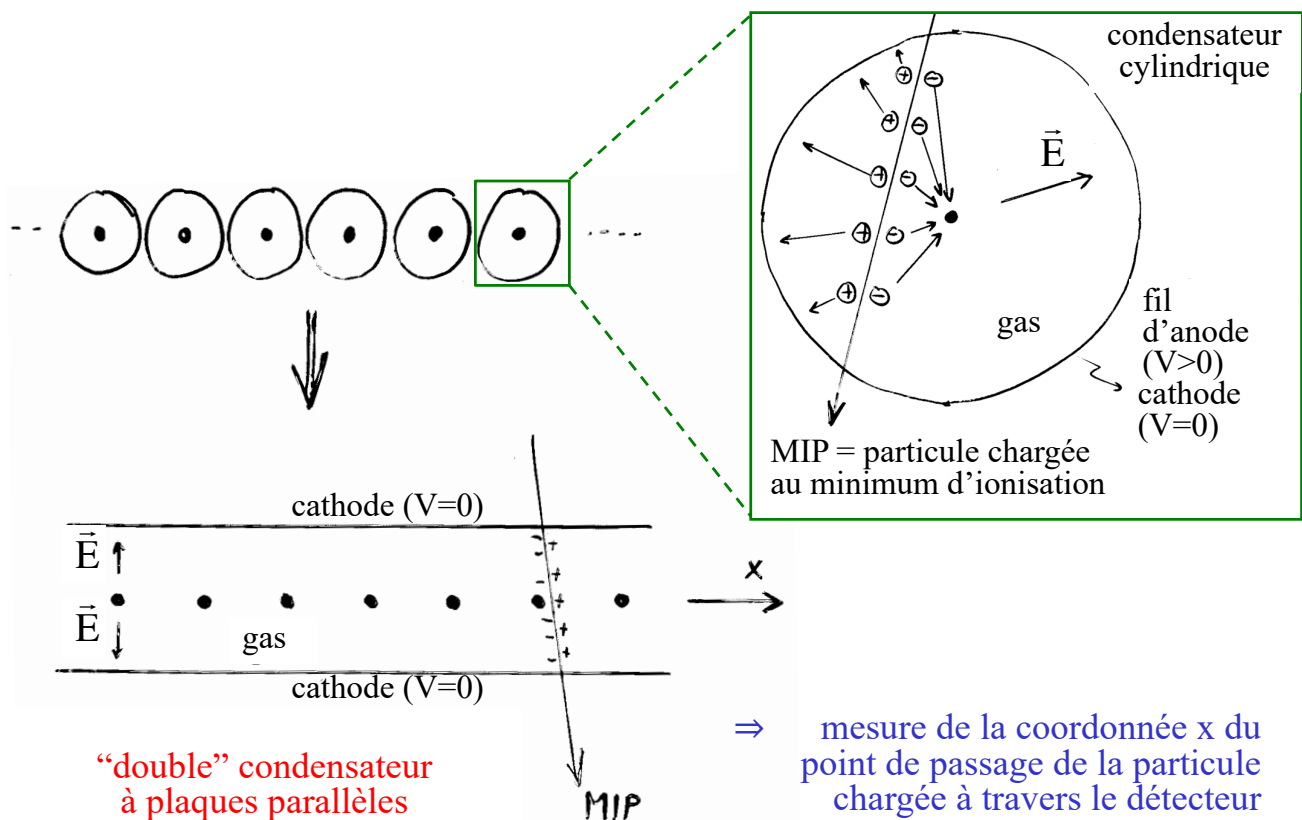
faisceau de  
pions chargés  
de  $16 \text{ GeV}/c$   
→



OS, 2 avril 2025

83

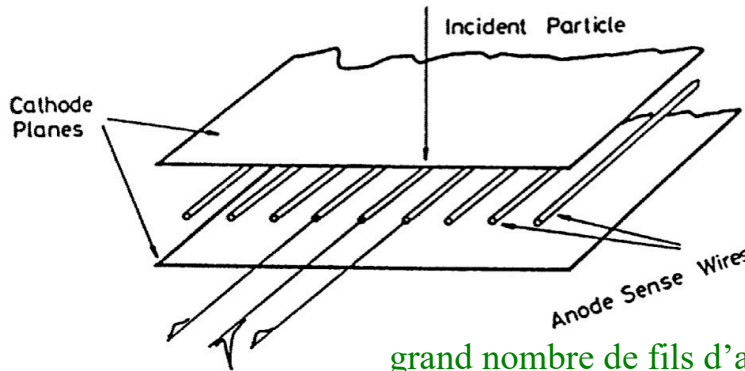
## Chambre proportionnelle multifilaire



OS, 2 avril 2025

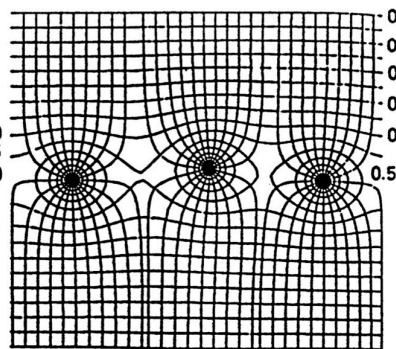
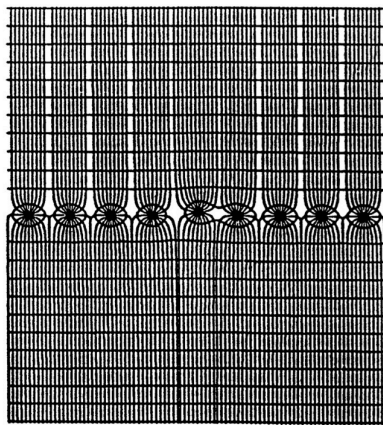
84

# Chambre proportionnelle multifilaire



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

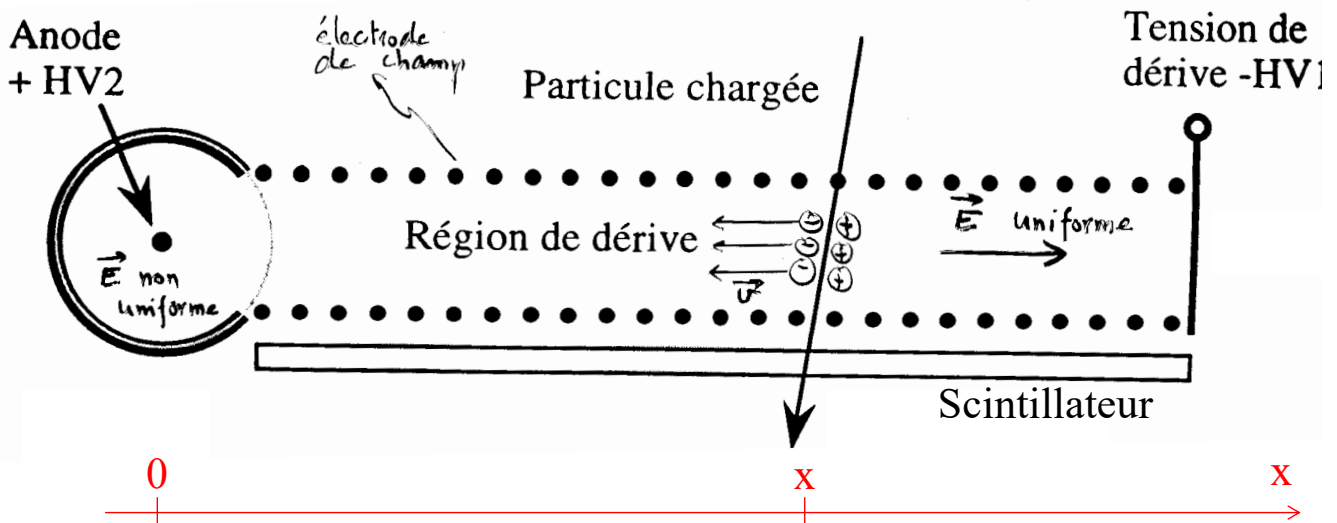
grand nombre de fils d'anode (canaux)  
→ lecture électronique des signaux



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

lignes de champ électrique et équipotentiels

## Chambre à dérivation



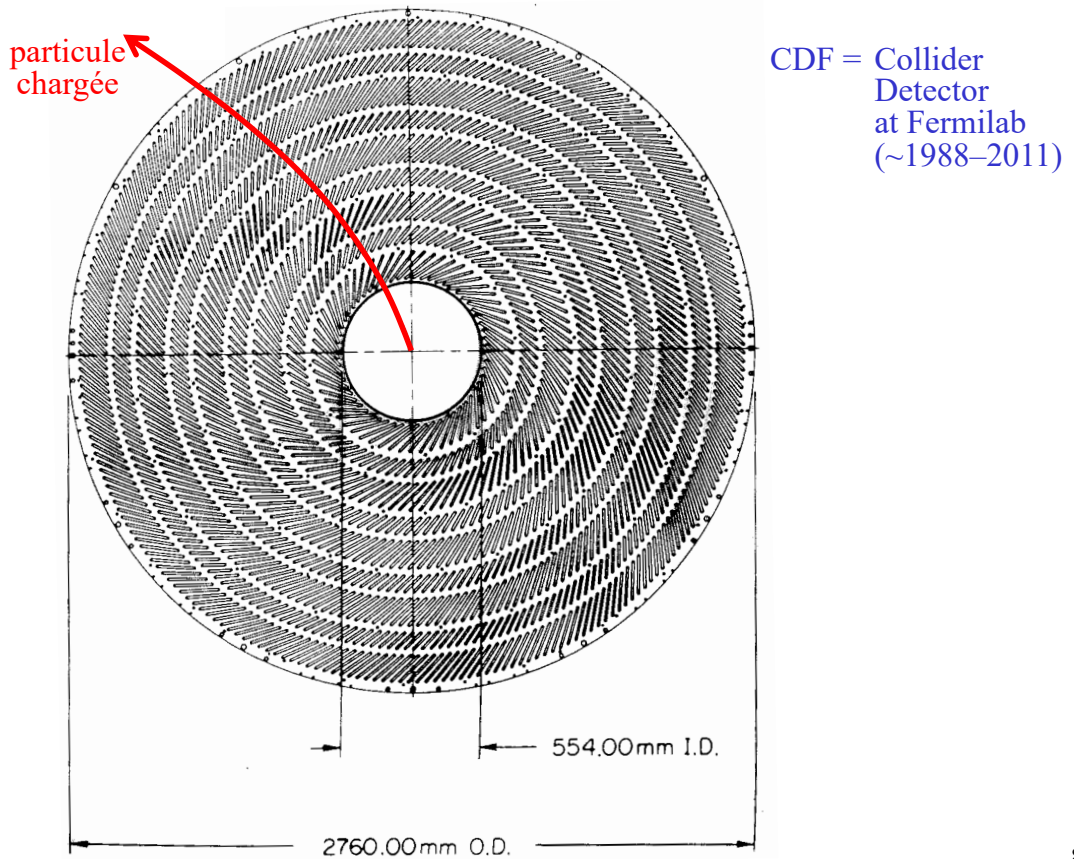
détection  
sur l'anode  
à  $t = \Delta t$  en  $x=0$

détection  
à  $t=0$  en  $x$

$$x = v\Delta t$$

$v$  = vitesse de dérivation des électrons (~constante)

# Chambre à dérive de CDF

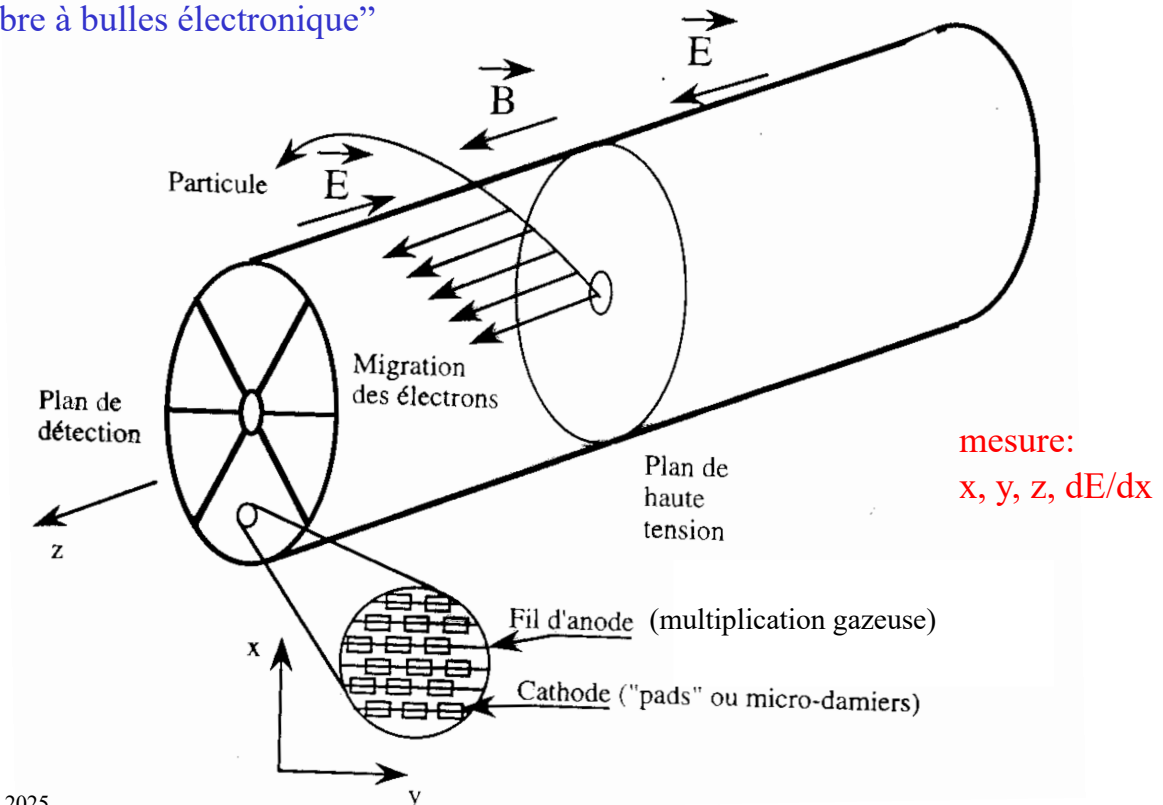


OS, 2 avril 2025

87

# Chambre à projection temporelle

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

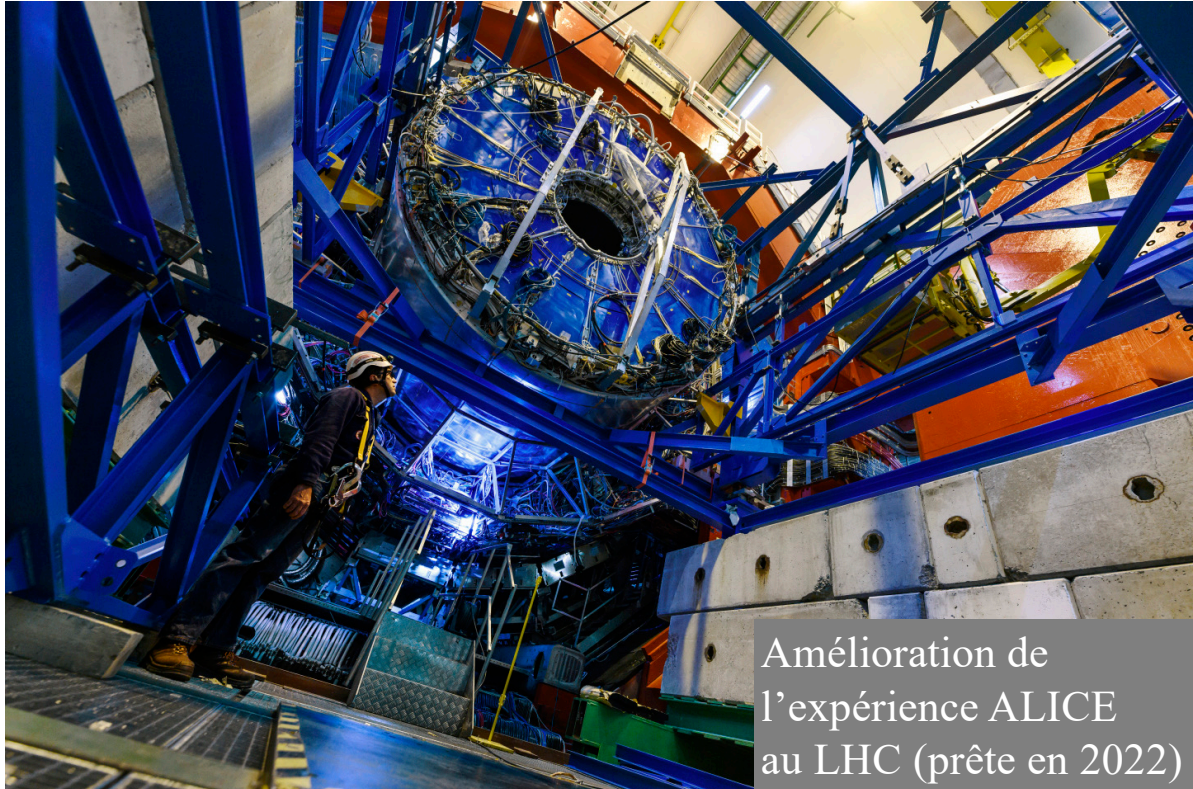


OS, 2 avril 2025

88



# Chambre à projection temporelle



TPC = Time Projection Chamber

OS, 2 avril 2025

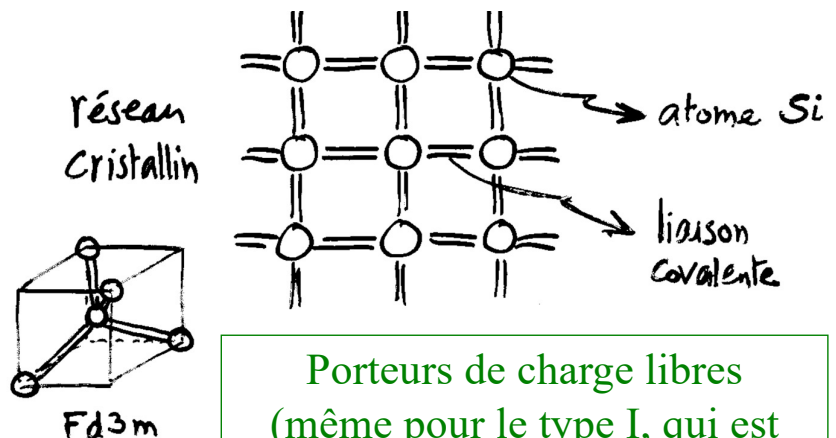
89

## Semi-conducteurs

### Intrinsèque (= pur)

#### Type I

- par exemple Si, Ge
- atomes tétravalents

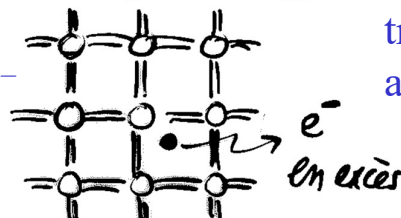


Porteurs de charge libres  
(même pour le type I, qui est  
toujours légèrement de type N)

### Extrinsèque (= dopé)

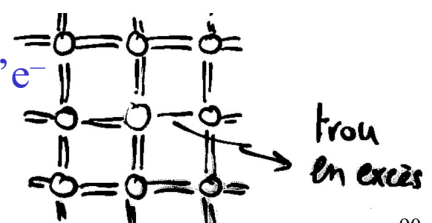
#### Type N

- dopant (P, As, ...)  
pentavalent  
donneur d' $e^-$



#### Type P

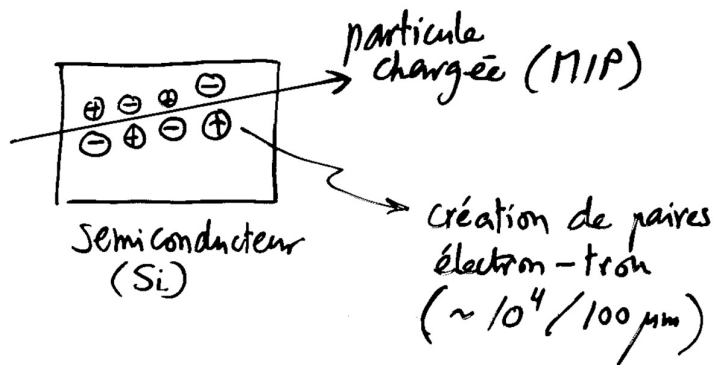
- dopant (B, Al, Ga, ...)  
trivalent  
accepteur d' $e^-$



OS, 2 avril 2025

90

# Détecteur à semi-conducteur

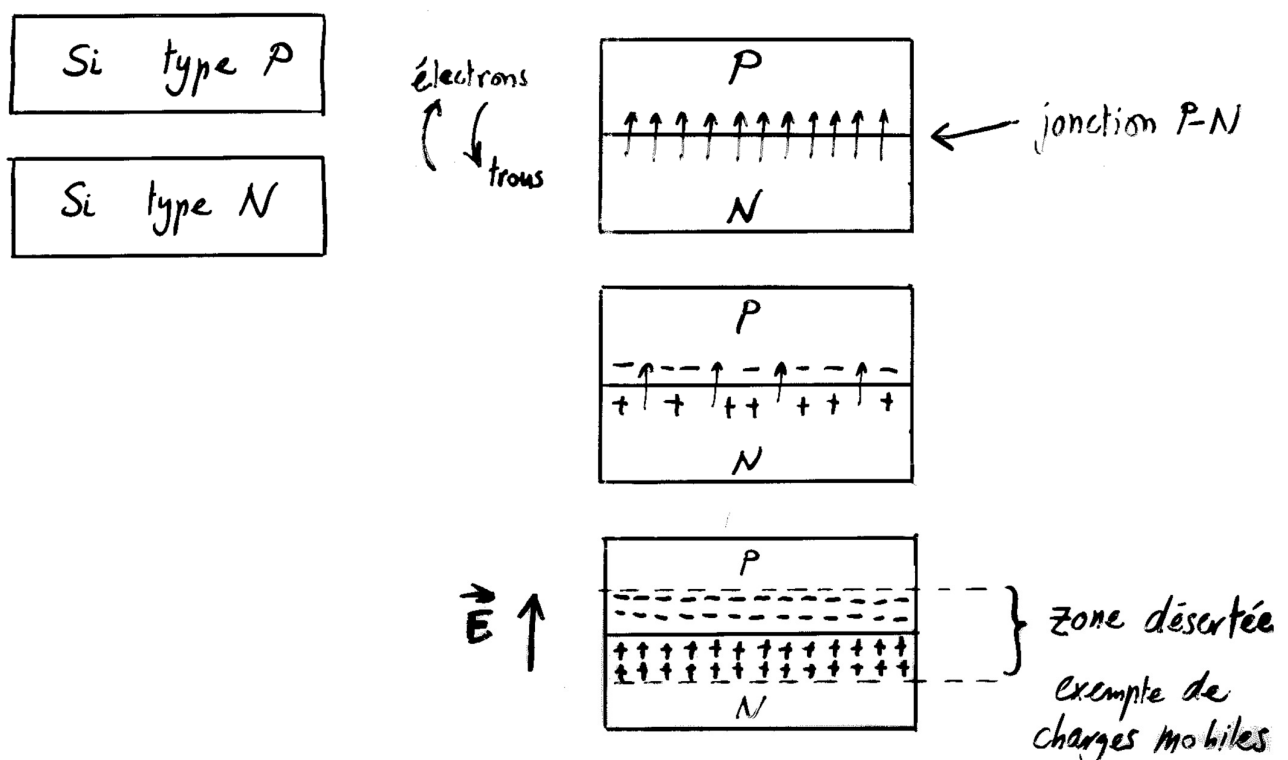


- Avantages sur les détecteurs à gaz:
  - plus compact, pas besoin de haute tension ni de bonbonnes de gaz
  - meilleure résolution
    - Energie pour créer une paire électron-trou (3.6 eV dans le Si)  
bien plus petite que celle pour ioniser un gaz (15–30 eV dans Ar)
- Mais ... un semi-conducteur n'est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

OS, 2 avril 2025

91

## Jonction P-N

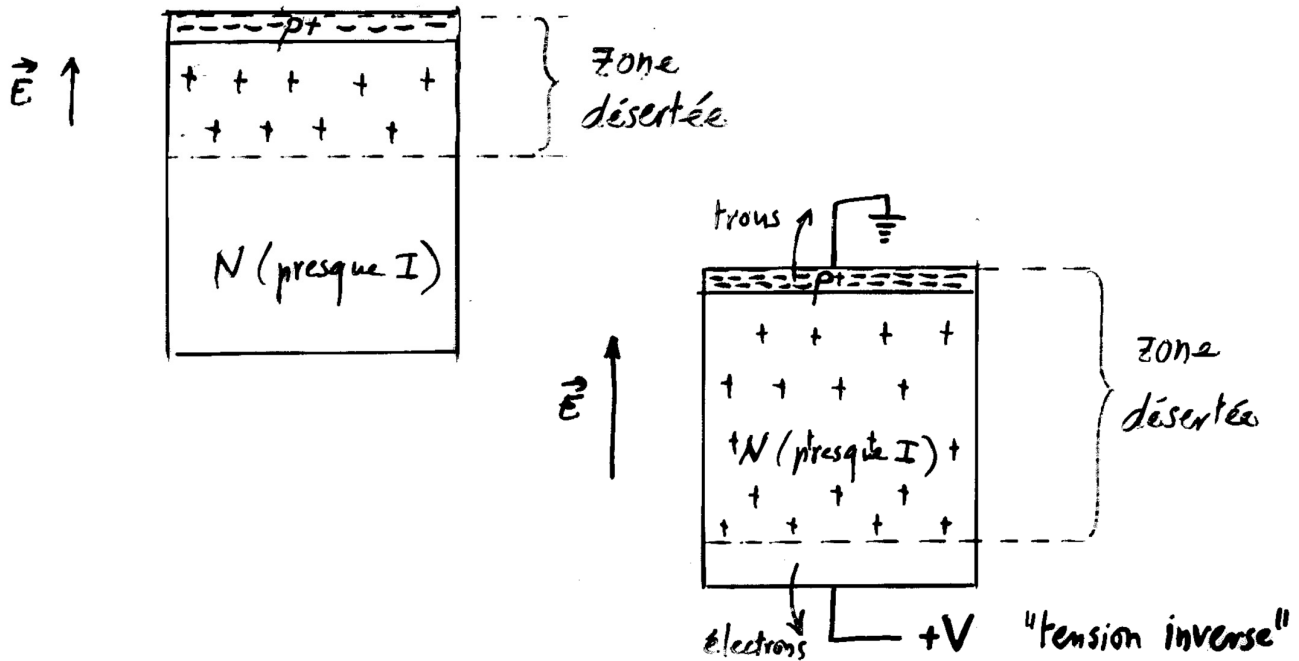


OS, 2 avril 2025

92

# 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

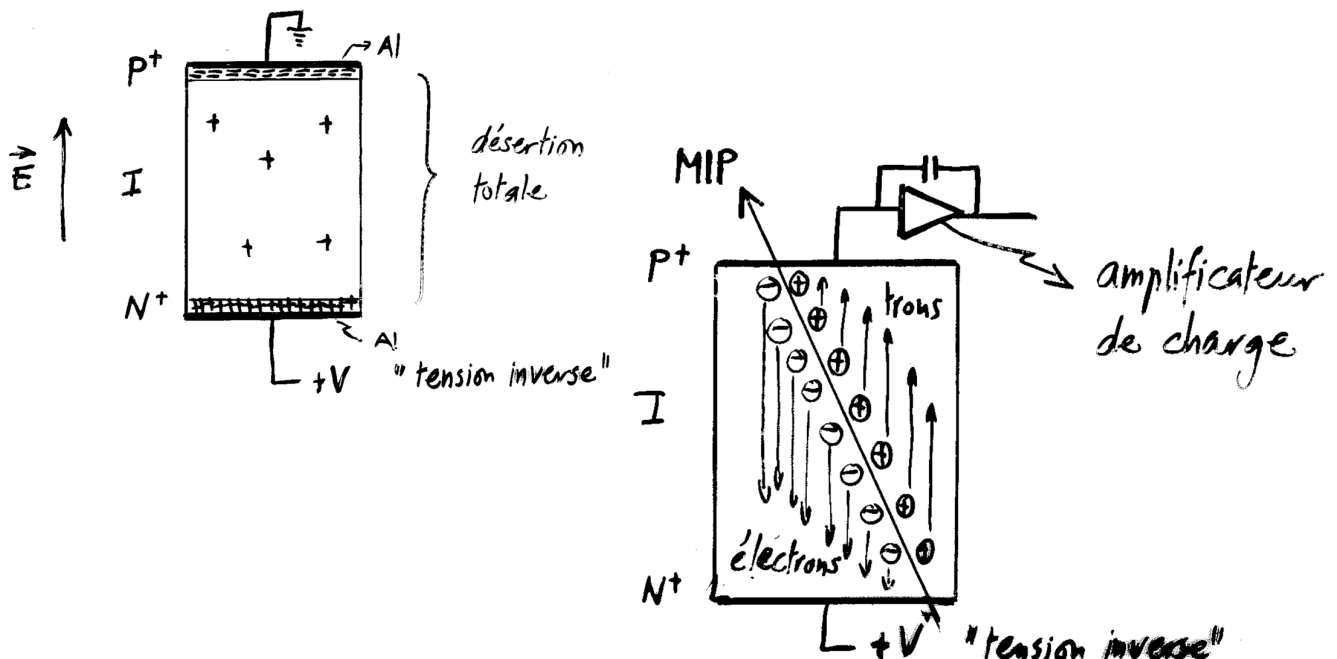


OS, 2 avril 2025

93

# Diode PIN

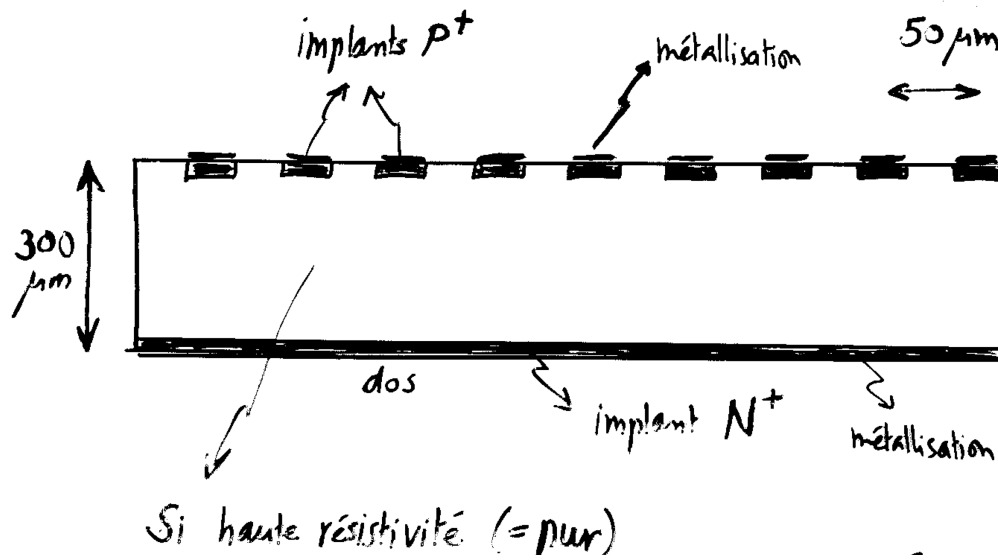
- Jonction P-N avec fort dopage N sur l'autre face (N+)
- Métallisation des deux faces (contact ohmique)



OS, 2 avril 2025

94

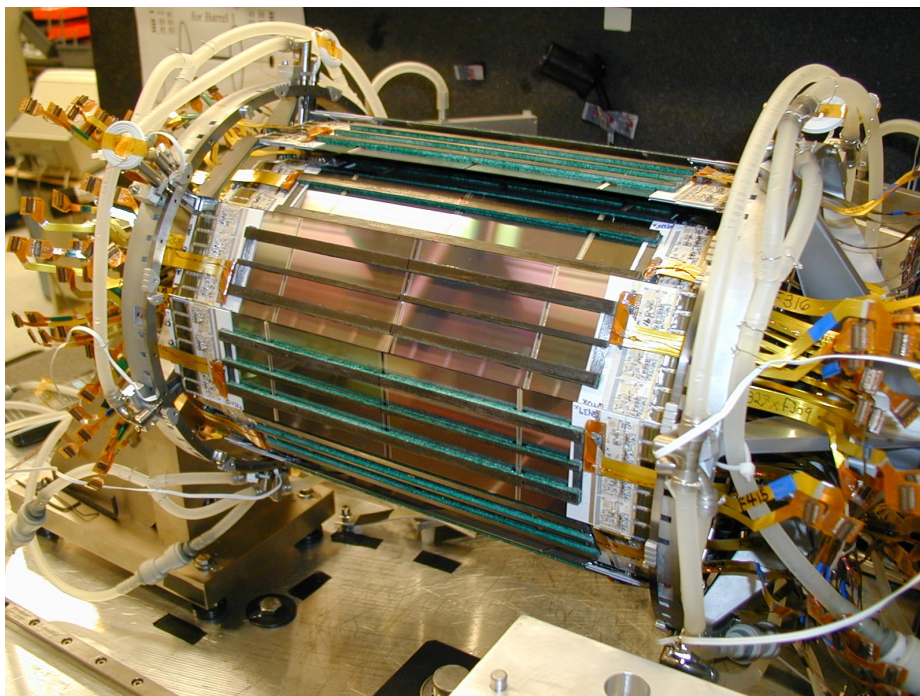
# Détecteur Si à micro-bandes



OS, 2 avril 2025

95

# Détecteur de vertex de CDF

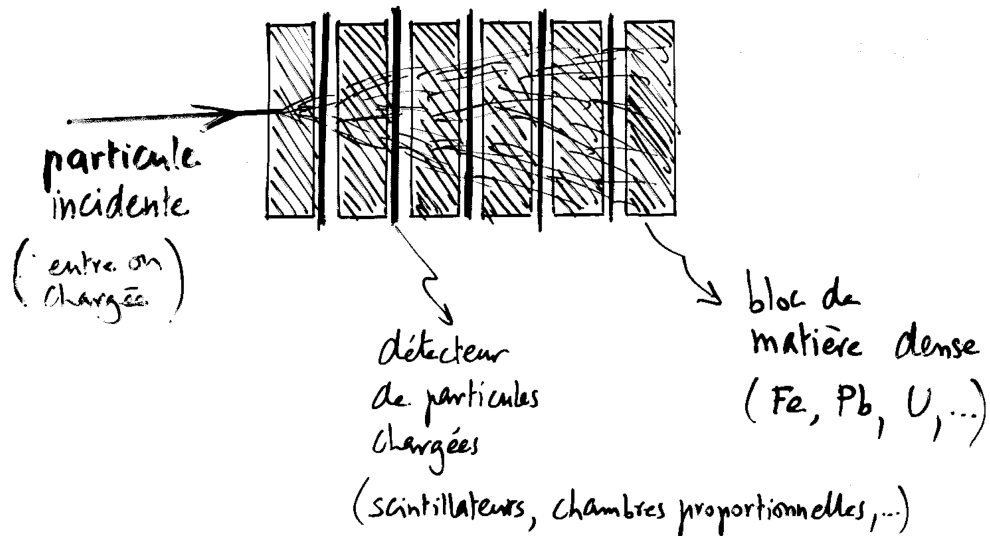


OS, 2 avril 2025

96



# 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)

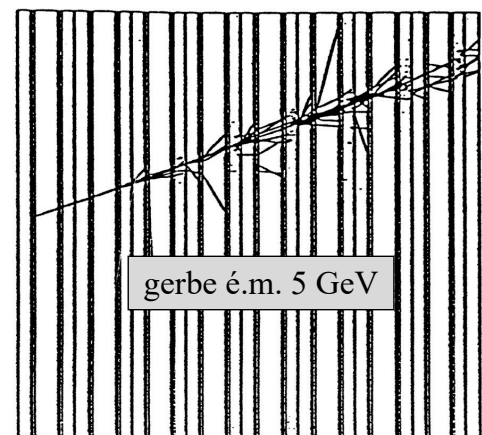
OS, 2 avril 2025

97

# Calorimètres

## • Calorimètre électromagnétique

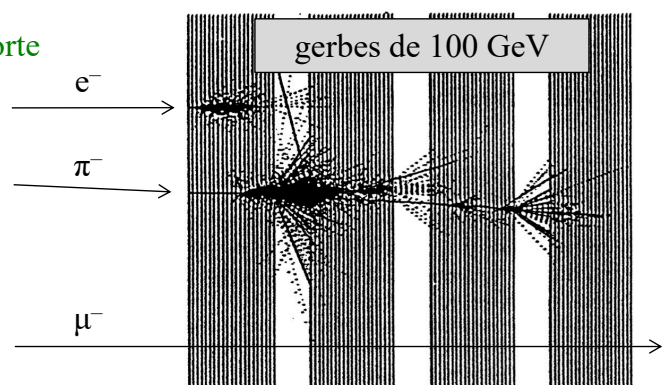
- détection de photons, électrons, positons qui forment des gerbes électromagnétiques
- également  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- épaisseur  $> 20 X_0$   
( $X_0$  = longueur de rayonnement)



## • Calorimètre hadronique

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

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



OS, 2 avril 2025

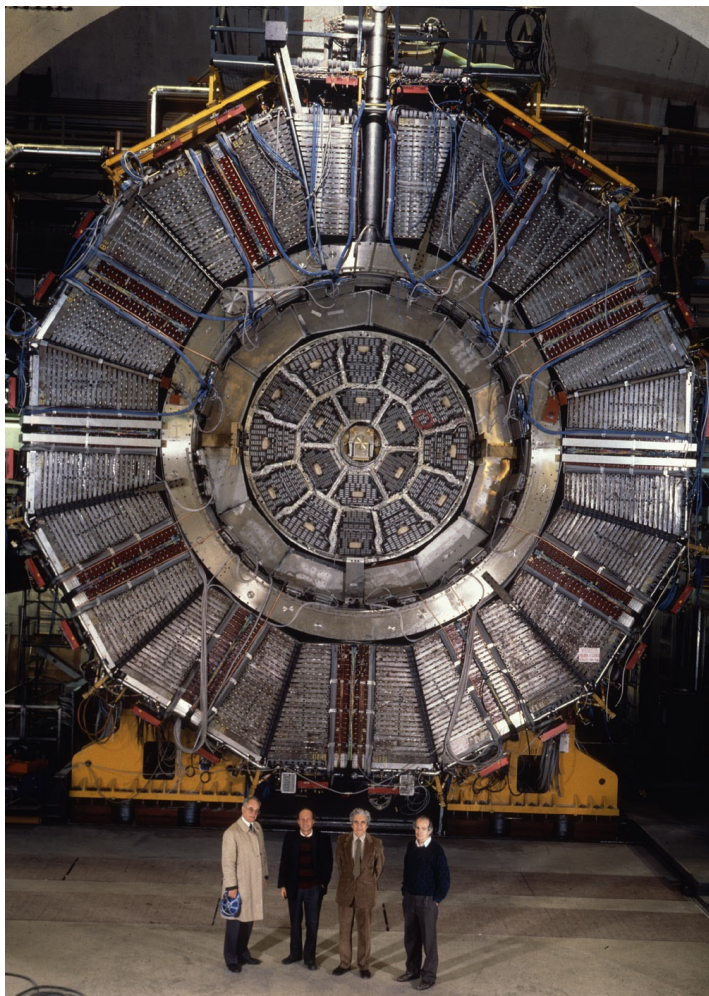
98

# Détecteur ALEPH

Expérience ALEPH  
au LEP (1989–2000)

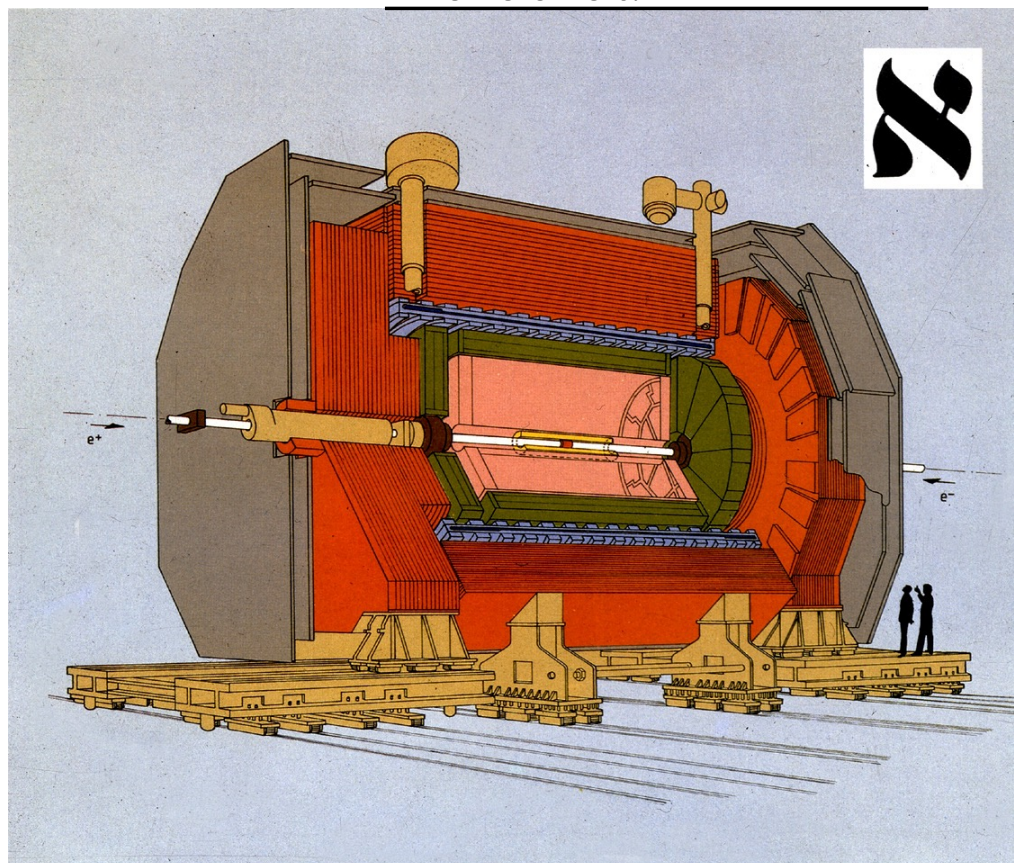
Etude collisions  $e^+e^-$   
à  $\sqrt{s} = 90\text{--}209\text{ GeV}$









OS, 2 avril 2025



99

## Détecteur ALEPH



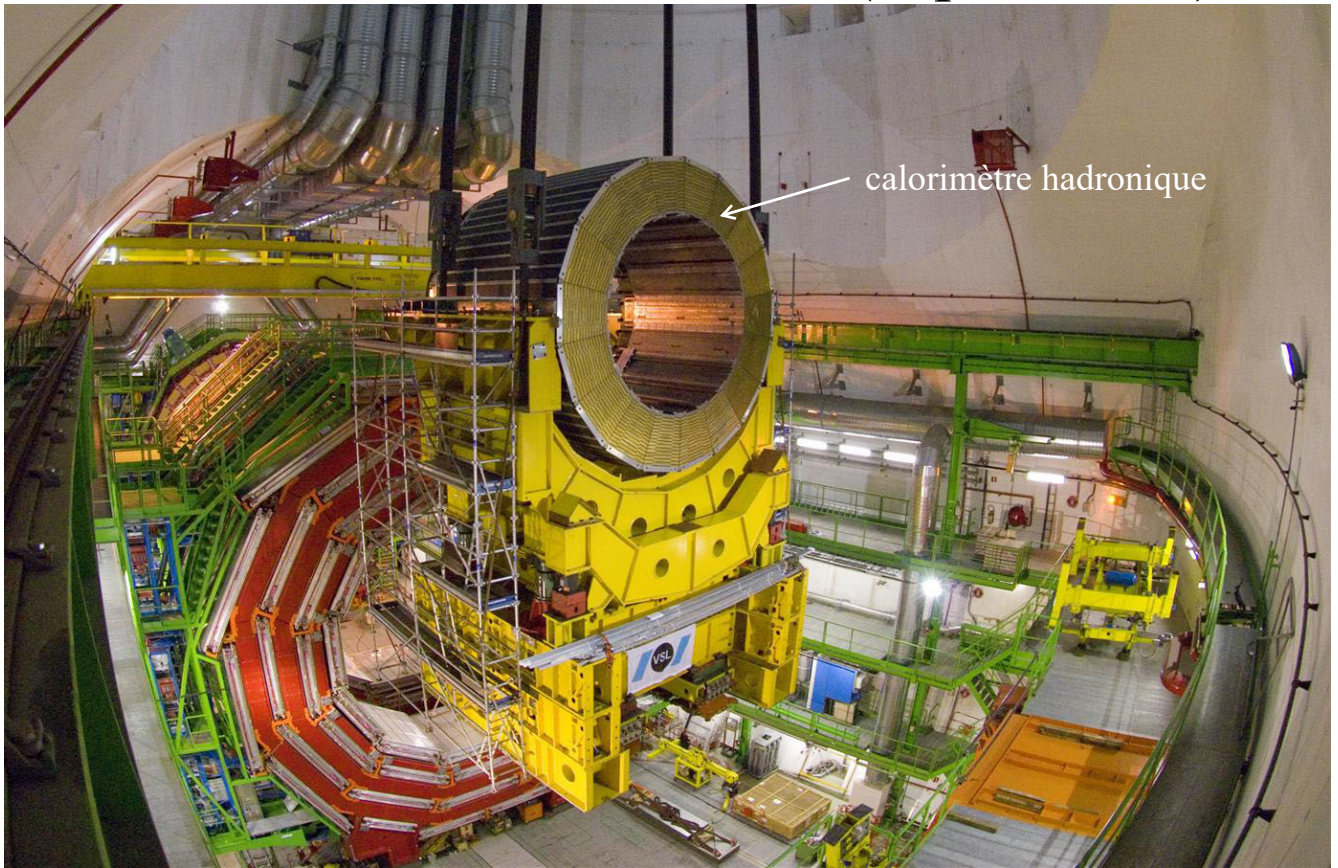
-  Vertex Detector
-  Inner Track Chamber
-  Time Projection Chamber
-  Electromagnetic Calorimeter
-  Superconducting Magnet Coil
-  Hadron Calorimeter
-  Muon Detection Chambers
-  Luminosity Monitors

OS, 2 avril 2025

100



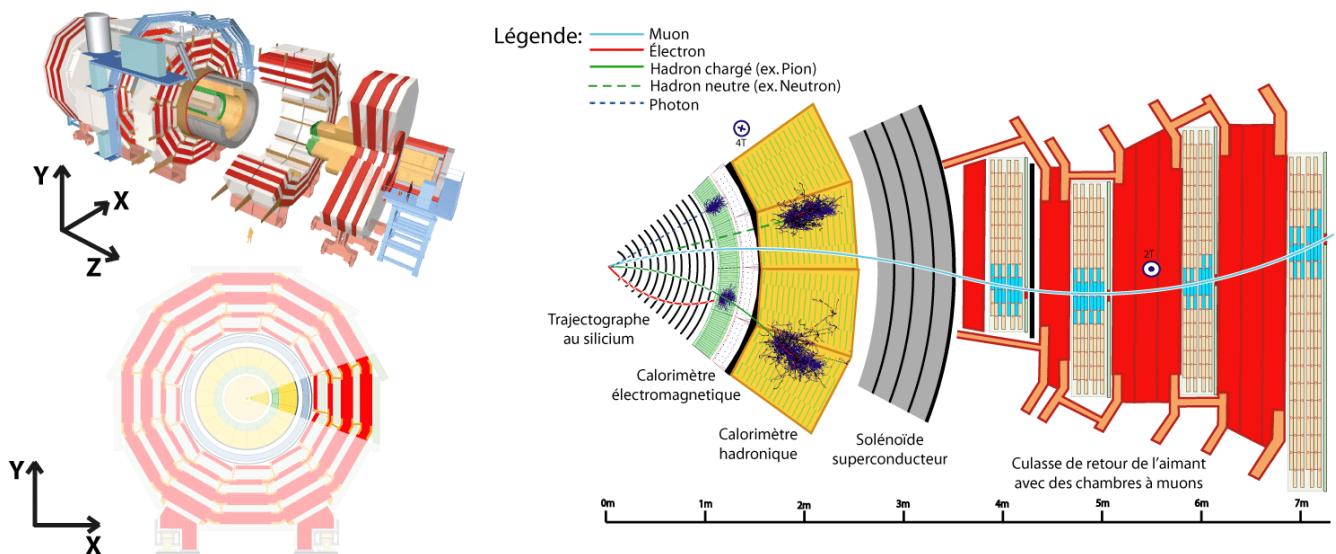
# Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)



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  $\mu^\pm$  ( $\tau \sim 2 \mu s$ )
- **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**)

OS, 2 avril 2025

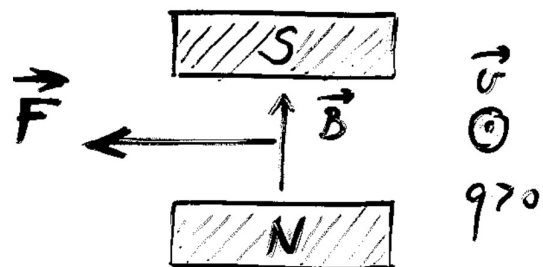
103

## Guidage des faisceaux

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

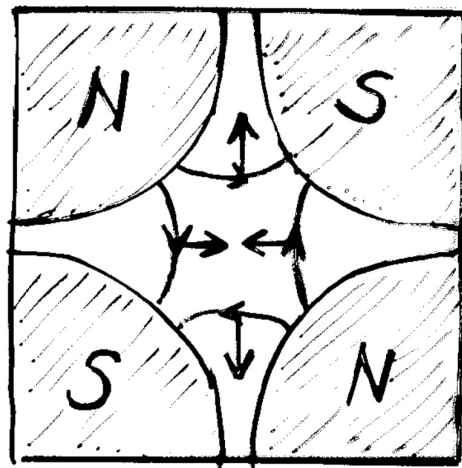
- **Déflexion**

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



- **Focalisation**

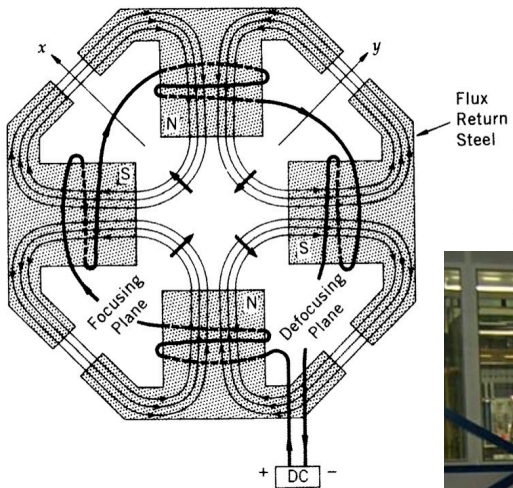
- **aimants quadrupolaires**
- focalisation dans un plan transverse, défocalisation dans l'autre
- Note: un doublet de quadrupôles focalise dans les deux plans



OS, 2 avril 2025

104

# Aimant quadrupolaire



Double quadrupôle pour les 2 faisceaux du LHC

