

---

# 2<sup>e</sup> partie : Détection des particules

I. Particules chargées

II. Photons

- 
- On va utiliser dans ce chapitre les concepts développés dans la première partie
    - La plupart des détecteurs présentés ici ont un point commun : l'énergie déposée est faible par rapport à l'énergie de la particule incidente
  
  - Bref historique :
    - Préhistoire : chambre à brouillard et compteur Geiger
    - Histoire : chambres à bulles et émulsions photographiques
    - Histoire contemporaine :
      - Détecteurs à ionisation
      - Détecteurs à scintillation
      - Détecteurs à semiconducteur

---

# 2<sup>e</sup> partie : Détection des particules

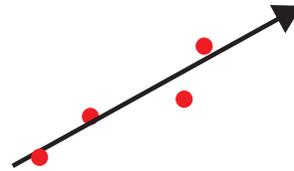
## I. Particules chargées

- 1) Détecteurs à ionisation
- 2) Détecteurs à scintillation
- 3) Détecteurs à semi-conducteurs
- 4) Techniques « exotiques »

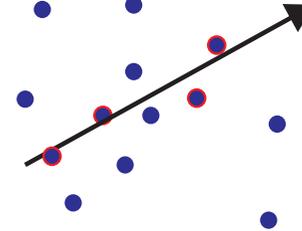
## II. Photons

- Ils détectent le passage d'une particule chargée en mesurant la charge totale (électrons + ions) produite par l'ionisation du milieu
- Le milieu peut être un gaz, un liquide ou un solide
- Si on ne fait rien, il est très probable que l'électron d'ionisation se recombine avec son ion originel
  - Pour récupérer les électrons avant la recombinaison, il faut appliquer un champ  $E$

Ionisation primaire



Ionisation totale



- Les particules chargées ionisent le gaz. Chaque **électron primaire** peu parfois ioniser lui-même d'autres atomes :  $\Rightarrow$  **l'ionisation totale est plus grande**

- Expérimentalement : 
$$n_{total} = \frac{\Delta E}{W_i} = \frac{\frac{dE}{dx} \Delta x}{W_i} \approx 3 - 4 n_{primaire}$$

où :

- $\Delta E$  : Energie totale déposée par ionisation
- $W_i$  : Energie moyenne nécessaire pour créer une paire électron/ion (typiquement 30 eV pour un gaz)

- Le potentiel d'ionisation  $I$  est différent de l'énergie  $W$  nécessaire pour créer une paire électron-ion car une partie de l'énergie part en chaleur

Tavernier

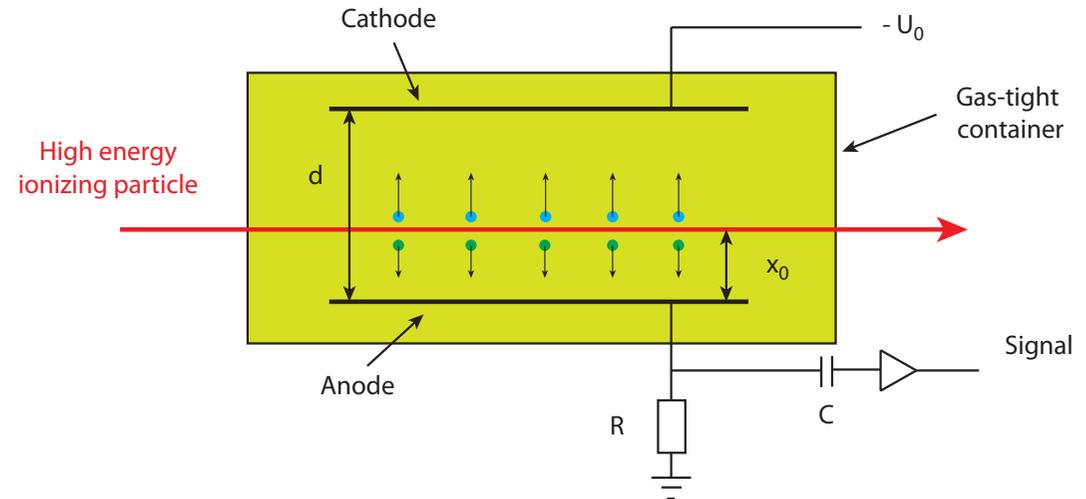
	Ionization potential $I$ (eV)	Mean energy $W$ per electron-ion pair (eV)	Energy loss for MIP (keV/cm)	Nb of electron-ion pairs (cm <sup>-1</sup> )	Nb of electrons (cm <sup>-1</sup> )
Argon (Ar)	15.7	25.0	2.53	106	25
Xenon (Xe)	12.1	22.0	6.87	312	41
Helium (He)	24.5	41.6	0.35	8.3	5
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	15.6	36.4	0.32	8.8	5.2
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	15.5	34.8	1.96	56.3	10
Air		33.8	2.02	59.8	
Oxygen (O <sub>2</sub> )	12.5	30.2	2.26	74.8	22
Methane (CH <sub>4</sub> )	12.6	30.0	1.61	54	37
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	13.8	34.0	3.35	100	35

≈ 10-20 eV      ≈ 30 eV

- Amplification nécessaire** car ≈ 100 e-/ion paires/cm est une très faible charge !

# Le détecteur gazeux le plus simple : la chambre à ionisation

- 2 plaques distantes de  $d$



- Valeurs typiques :  $d = 5 \text{ cm}$  et  $E = 500 \text{ V/cm}$ 
  - Electrons et ions dérivent dans un champ  $E$  :  
 $v^+ = 7,5 \text{ mm/ms}$  et  $v^- = 5 \text{ mm}/\mu\text{s}$
  - Signaux très faibles et requièrent soit une très bonne électronique, soit une forte amplification, soit les deux
  - Le choix du gaz a une influence sur le signal

Ceci peu être étendu à tous les détecteurs à ionisation

- Une des premières chambres à ionisation :

Chambre à ionisation de Pierre  
Curie en 1895

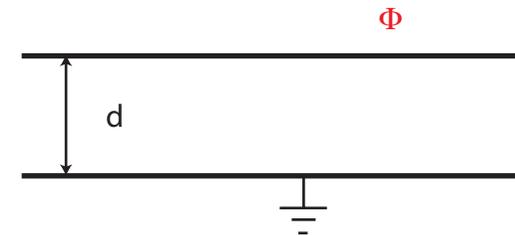


# Champ électrique vs forme de la chambre

- Trois types de géométries:

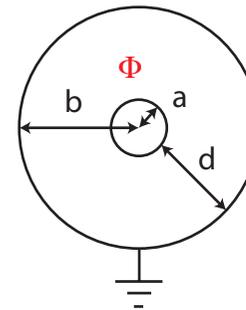
- Plaques parallèles

$$E = \frac{\Phi}{d}$$



- Géométrie cylindrique

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



$$\begin{aligned} a &= 1 \text{ cm} \\ b &= 3 \text{ cm} \\ d &= 2 \text{ cm} \\ \Phi &= 100 \text{ V} \end{aligned}$$

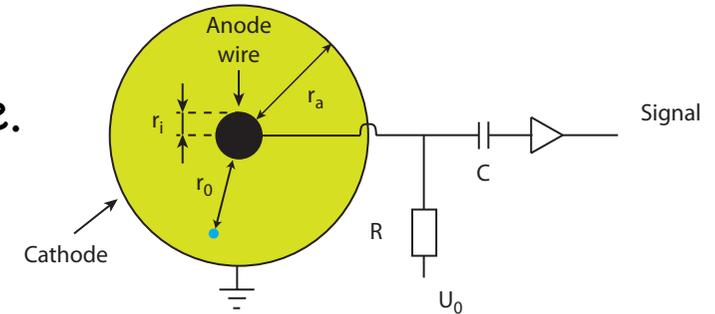
- Géométrie sphérique

$$E(r) = \frac{\Phi a b}{r^2 (b - a)}$$

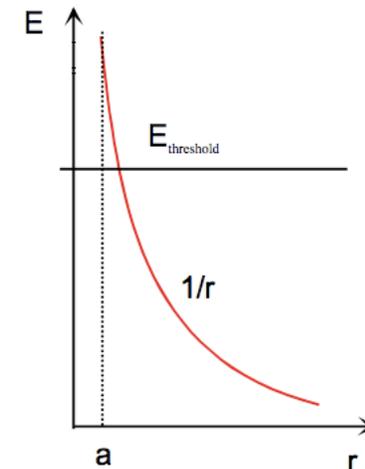
- Pour augmenter le champ, il est nécessaire d'aller vers des géométries cylindriques (la géométrie sphérique est peu pratique)

# Le plus simple des compteurs proportionnels : un fil

- Les électrons dérivent vers le fil d'anode. Le champ  $E$  est en  $1/r$ . Au delà d'un certain seuil, les électrons ionisent le gaz : création d'une **avalanche** !
  - Gain typique :  $10^4 - 10^5$
  - L'échelle de temps de l'amplification est de l'ordre de quelques ns
  - Mesure dans une direction uniquement
  
- **Le signal est proportionnel à l'ionisation initiale** : on mesure  $dE/dx$



$$E = \frac{C V_0}{2 \pi \epsilon_0} \frac{1}{r}$$



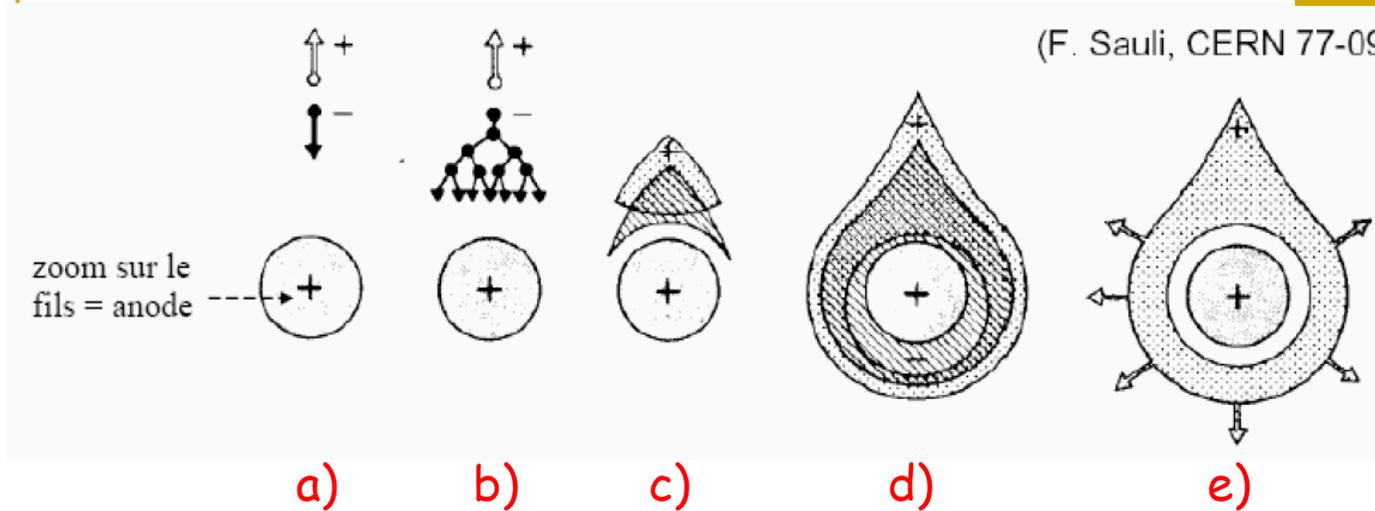
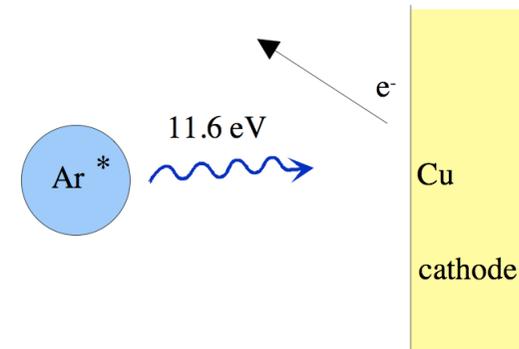


Photo d'une  
avalanche

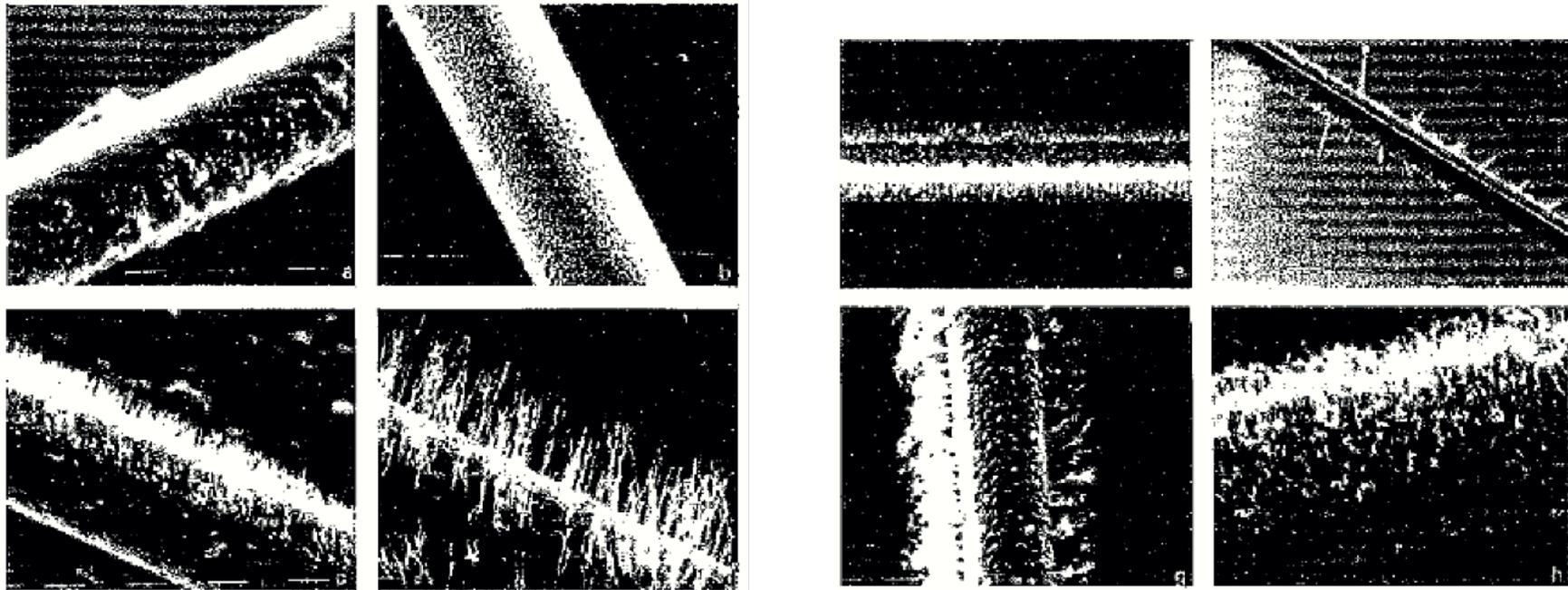
- Dynamique non triviale :
  - a) L'électron unique dérive vers l'anode
  - b) Début de l'avalanche
  - c) Comme les électrons et les ions sont créés au même endroit, l'avalanche s'arrête lorsque le champ  $E$  est diminué par le champ des ions
  - d) Le nuage d'électrons dérive rapidement vers l'anode (50 mm/ms sur 20 mm  $\rightarrow$  max 1-2 ns)
  - e) Le nuage des ions dérive lentement vers la cathode

# Choix du gaz

- On choisit généralement des gaz nobles pour lesquels la dissipation d'énergie a lieu principalement par ionisation (pas d'états de vibration ou de rotation)
- La contrepartie à l'utilisation des gaz nobles est qu'un atome excité a une très forte probabilité de se désexciter par émission d'un photon UV (11.6 eV pour Ar)
- Cette valeur est  $>$  au seuil d'ionisation pour les métaux (exemple 7.7 eV pour Cu)
  - Avalanche permanente par émission d'électrons par les parois !



- Pour résoudre le problème, on introduit dans le gaz noble une petite quantité d'un gaz polyatomique possédant des états de vibration et de rotation
  - Ce **quencher** va absorber les photons UV avant les parois
  - On utilise souvent du méthane ( $\text{CH}_4$ ) ou de l'isobutane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )
  - Avec le temps, le quencher (isolant la plupart du temps) se dépose sur le fil et perturbe le fonctionnement du détecteur
  
- Exemple typique : 70% Ar, 29,6%  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  et 0,4% Fréon

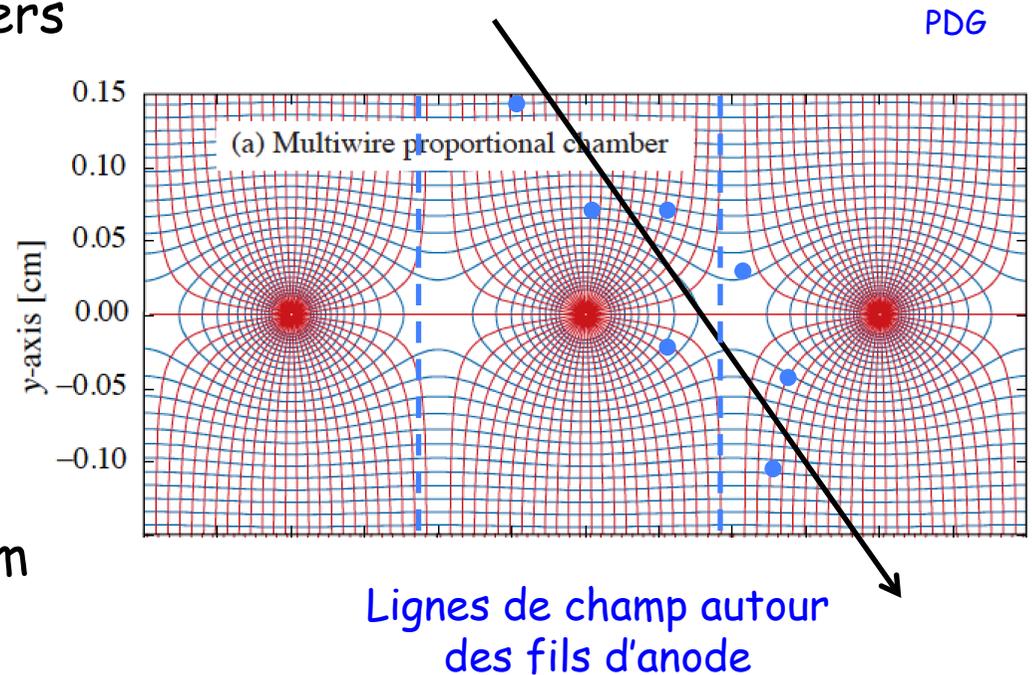
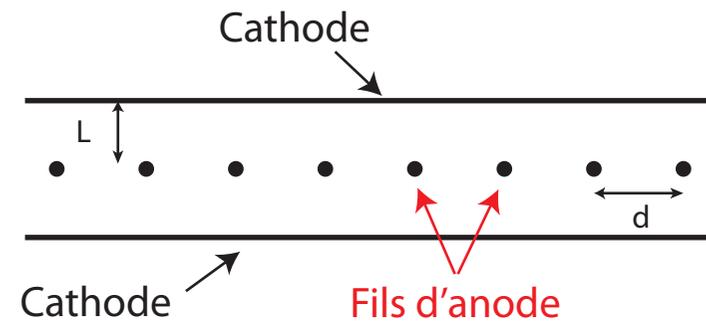


Défauts dus au vieillissement

- Plusieurs problèmes ont été identifiés :
  - Changement de la résistance à cause du dépôt sur l'anode
  - Polymérisation « en chevelure » : claquages dus à l'effet de pointe
  
- Le choix du gaz est une alchimie complexe entre le gain, le vieillissement, le coût, la sécurité, ...

# Les MWPC

- Extension du principe par Charpak et al (1968)
  - On obtient les **MWPC** ≡ **M**ulti **W**ire **P**roportional **C**hambers
  - Typiquement :  $L = 5 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$
- La résolution est limitée à :  $\sigma \approx \frac{d}{\sqrt{12}}$ 
  - Soit  $300 \mu\text{m}$  pour  $d = 1 \text{ mm}$
- Inconvénient : faible volume de détection

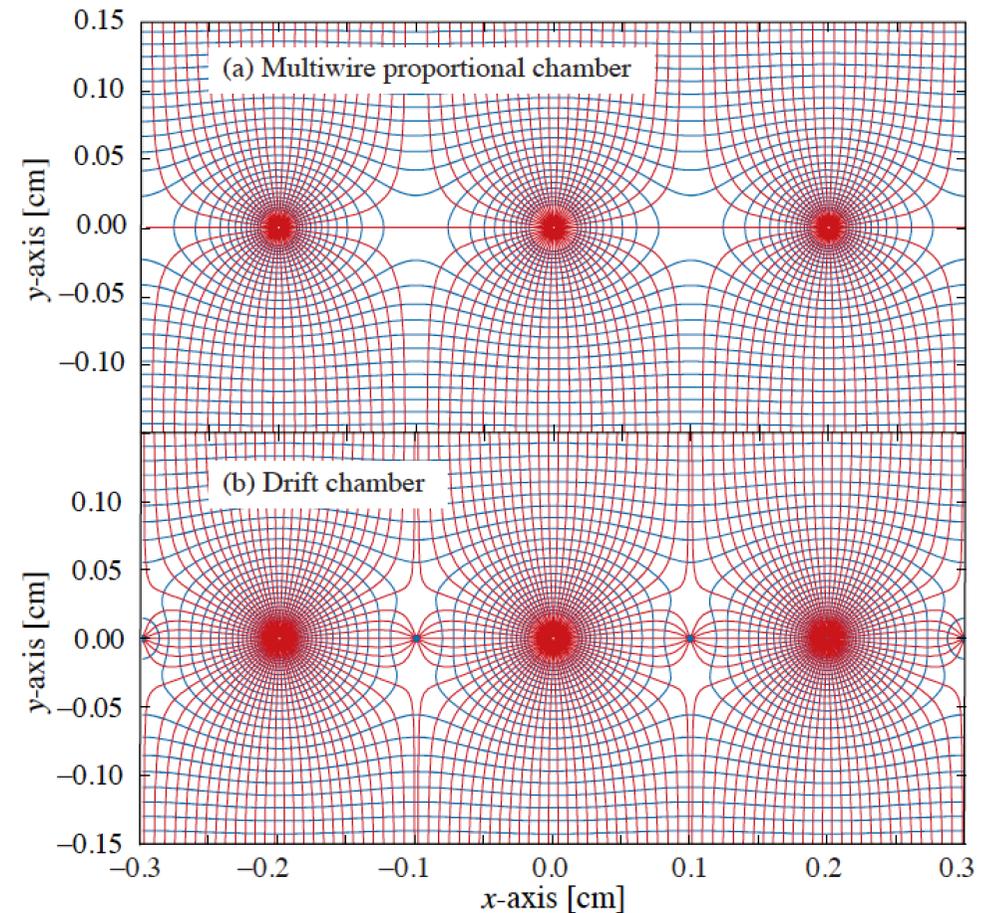


# Des MWPC aux chambres à dérivation

PDG

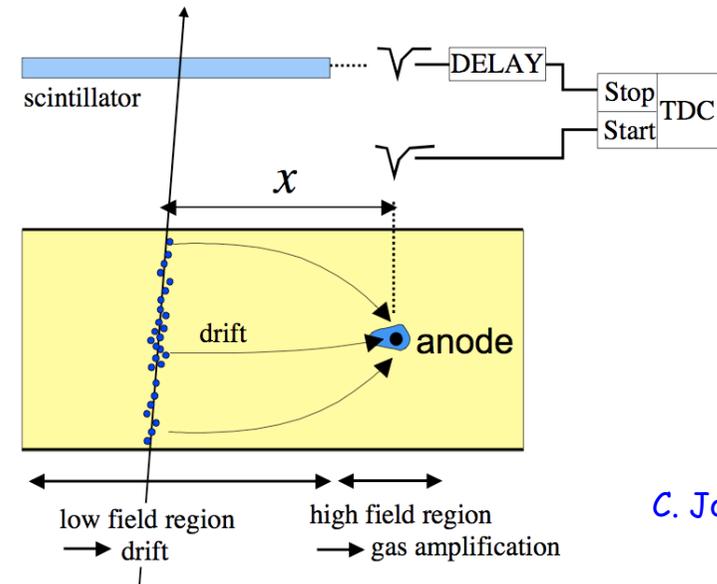
- La chambre reste inutilisable pendant le temps de dérivation des ions !
- Améliorer la collection des charges par addition d'un fil au bon potentiel

Lignes de champ autour des fils d'une MWPC et d'une chambre à dérivation



# Chambres à dérivation

- Un inconvénient majeur des MWPC est que le volume de détection est faible. On peut au contraire avoir des volumes énormes avec des **chambres à dérivation**



C. Joram

- La mesure du temps permet d'accéder à la coordonnée  $x$ : 
$$x = \int v_D(t) dt$$
- Inconvénients : on doit contrôler la dérivation des électrons
  - Processus de diffusion
  - Comment évaluer la vitesse ?
  - Détecteur relativement lent
    - Temps de dérivation typiques :  $5 \text{ cm}/\mu\text{s}$  ( $e^-$ ),  $500 \mu\text{m}/\mu\text{s}$  (ions)

# Mobilité

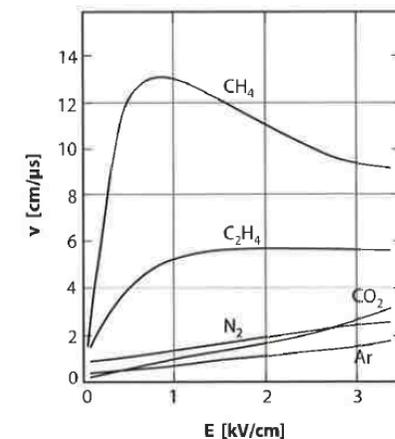
- La vitesse des ions est proportionnelle au champ  $E$  ( $\lambda$  libre parcours moyen et  $M$  masse des ions) :

$$v_d(E) = \mu E \quad \text{avec} \quad \mu = \frac{e \lambda}{\sqrt{12 k_B T M}}$$

- Le coefficient  $\mu$  est la **mobilité des ions** (en  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
  - Valeurs typiques : quelques  $\text{cm}/\text{ms}$  pour  $E = 1 \text{ kV}/\text{cm}$
- La vitesse des  $e^-$  n'est pas proportionnelle à  $E$ 
  - Valeurs typiques : quelques  $\text{cm}/\mu\text{s}$  pour
  - $E = 1 \text{ kV}/\text{cm}$  ( $10^4$  plus rapide que les ions)

Gas	Ion	Mobility ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
Ar	$\text{Ar}^+$	1.54
Ar	$\text{CH}_4^+$	1.87
Ar	$\text{C}_2\text{H}_6^+$	2.06
Ar	$\text{CO}_2^+$	1.72
He	$\text{He}^+$	10.4
$\text{CO}_2$	$\text{CO}_2^+$	1.09

Quelques mobilités d'ions

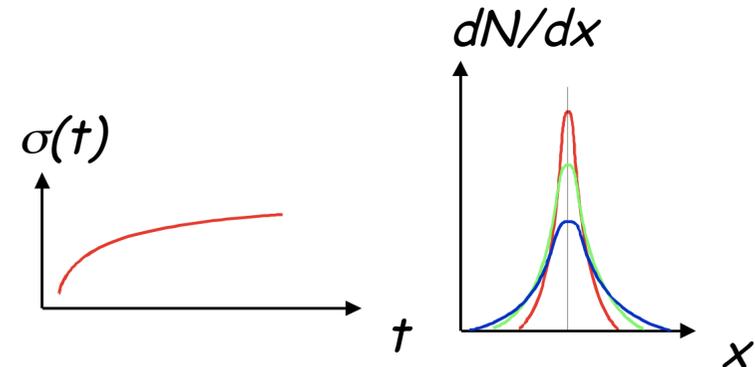


Vitesse des  $e^-$  versus  $E$  pour quelques gaz

# Diffusion et dérive

- En l'absence de champ, les électrons et les ions vont diffuser par collision sur les atomes du gaz

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dx} = \frac{N}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \\ \sigma(t) = \sqrt{2Dt} \end{array} \right.$$

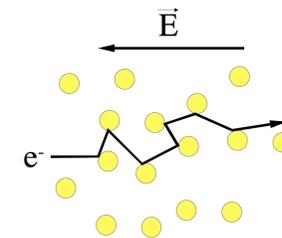


- Plus la chambre sera grande, plus la diffusion va étaler la trace

- En présence d'un champ  $E$ , les électrons vont se déplacer avec une vitesse moyenne constante

$$\vec{F}_v = -\frac{m}{\tau} \vec{v} \quad \implies \quad \vec{v}_D = \frac{e\tau}{m_e} \vec{E}$$

$F_v$  : force de frottement visqueux



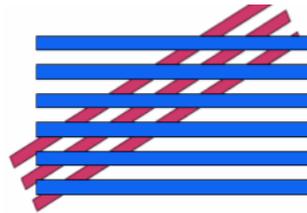
- En présence de **champs  $E$  et  $B$** , la vitesse de dérive s'écrit :

$$\mathbf{v} = \frac{e}{m_e} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \left( \mathbf{E} + \frac{\omega \tau}{B} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) + \frac{\omega^2 \tau^2}{B^2} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B} \right)$$

- Cas particulier :  $E$  et  $B$  parallèles
  - La diffusion longitudinale est inchangée, mais dans la direction transverse, les  $e^-$  spiralent sur un cercle de rayon  $v_T/\omega$
  - Le coefficient de diffusion transverse devient :

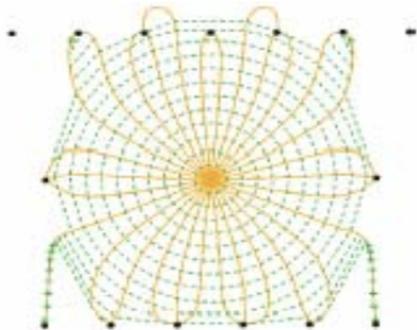
$$D_T(B) = \frac{D_T(0)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{Inférieur à } D_T(0)!!$$

- La mesure de la 2<sup>e</sup> coordonnée transverse est facile à obtenir :
  - en croisant des MWPC
  - en prenant deux orientations de fils différentes dans une chambre à dérives



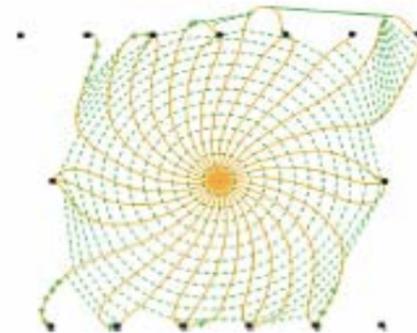
- La présence du champ  $B$  modifie la dérives des  $e^-$

Sans  
champ  $B$



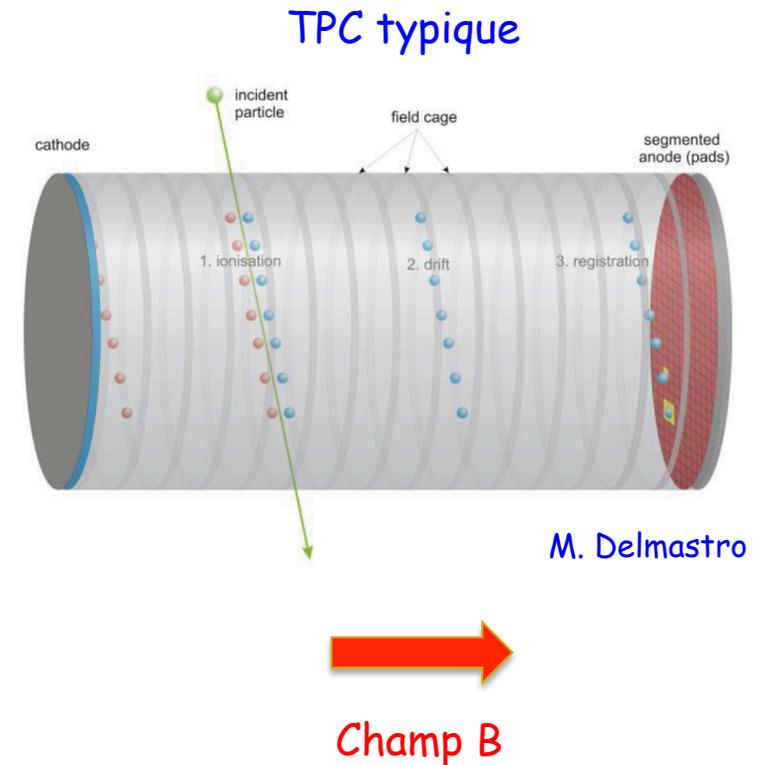
Les trajectoires  
des électrons  
sont modifiées  
par le champ  $B//E$   
→ Calibration

Avec  
champ  $B$



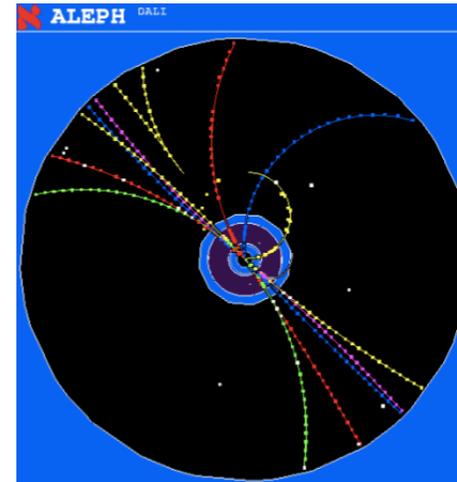
# Une extension des chambres à dérives : les TPC

- **TPC**  $\equiv$  **T**ime **P**rojection **C**hamber
- $E//B$  (solénoïde). Le coefficient de diffusion transverse est réduit car typiquement  $\omega \tau \approx 10$  !
- La base des détecteurs de traces sur collisionneurs  $e^+e^-$
- Permet une reconstitution des traces en 3D
  - $x$  et  $y$  viennent du fil et du segment touchés
  - $z$  provient du temps de dérive
- Permet également une mesure de  $dE/dx$
- Calibration pour la connaissance précise de  $E$  dans tout le volume

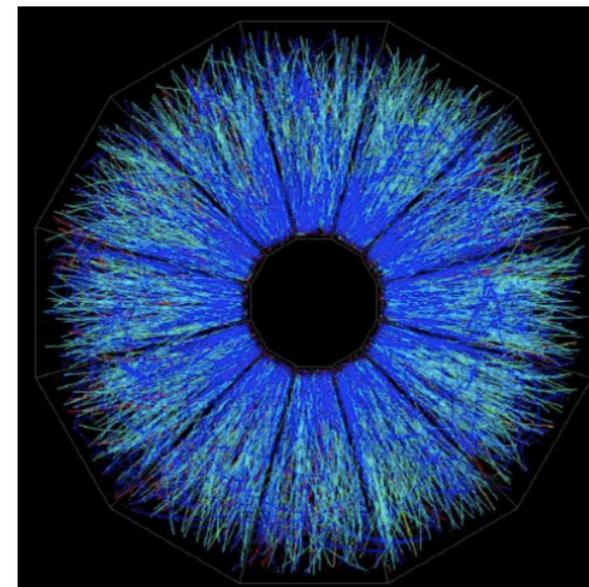
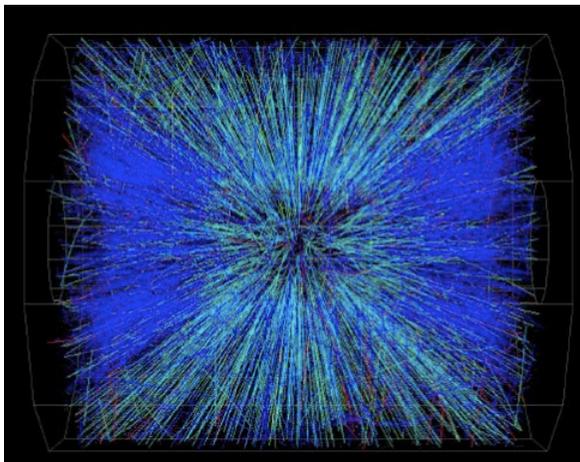


# Les TPC d'ALEPH et STAR

ALEPH :  $e^+e^-$   
(200 GeV)



STAR : Au+Au (130 GeV/nucléon)  
avec 2000 traces



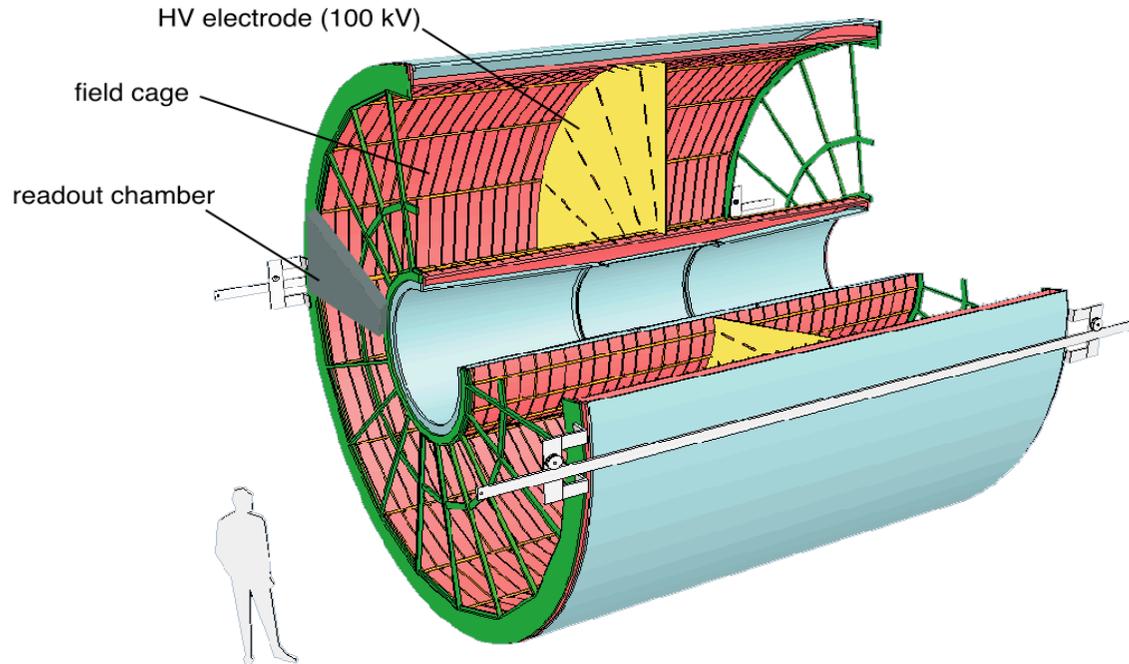
# La TPC d'ALICE

Main tracking detector for charged particles of the ALICE Central Barrel

**Largest TPC ever built**

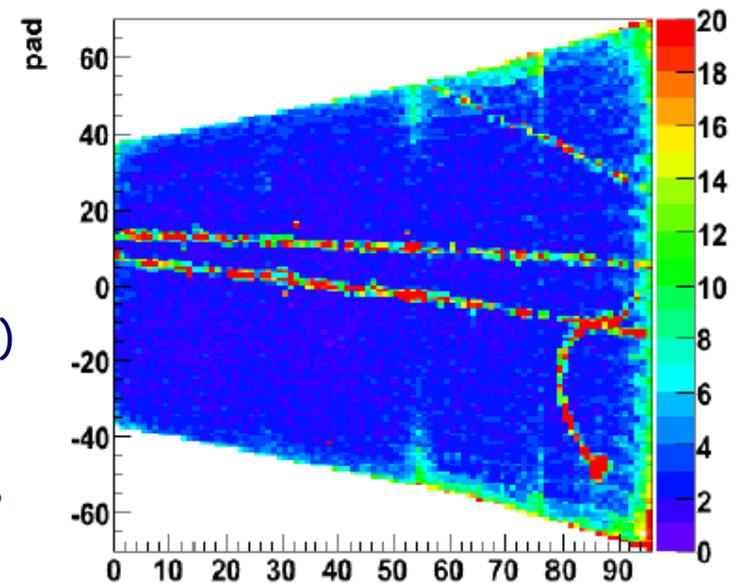
length = 5.1 m  
 diameter = 5.6 m  
 volume = 88 m<sup>3</sup>

inner radius = 0.9 m  
 outer radius = 2.5 m



Optimized for large track densities (up to  $dN/dy = 8000$ )

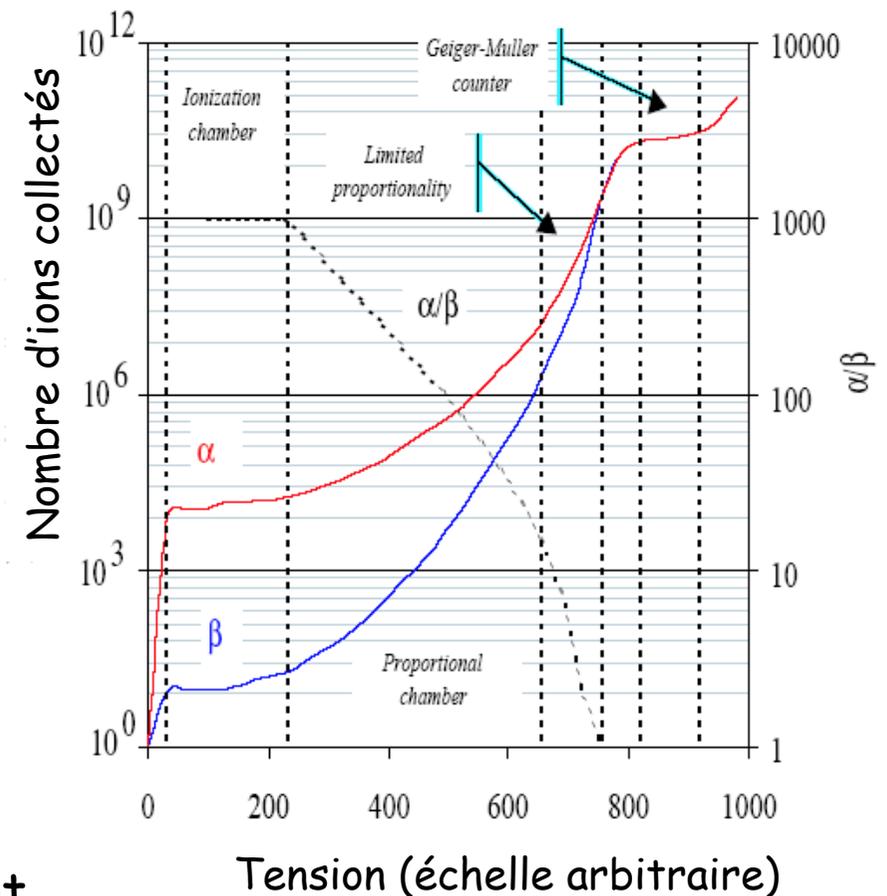
- track finding
- momentum measurement ( $p_T$  resolution = 5% at 10 GeV)
- particle identification via  $dE/dx$  ( $\sigma(dE/dx) = 5.5$  to 6% depending on multiplicity)



row  
98

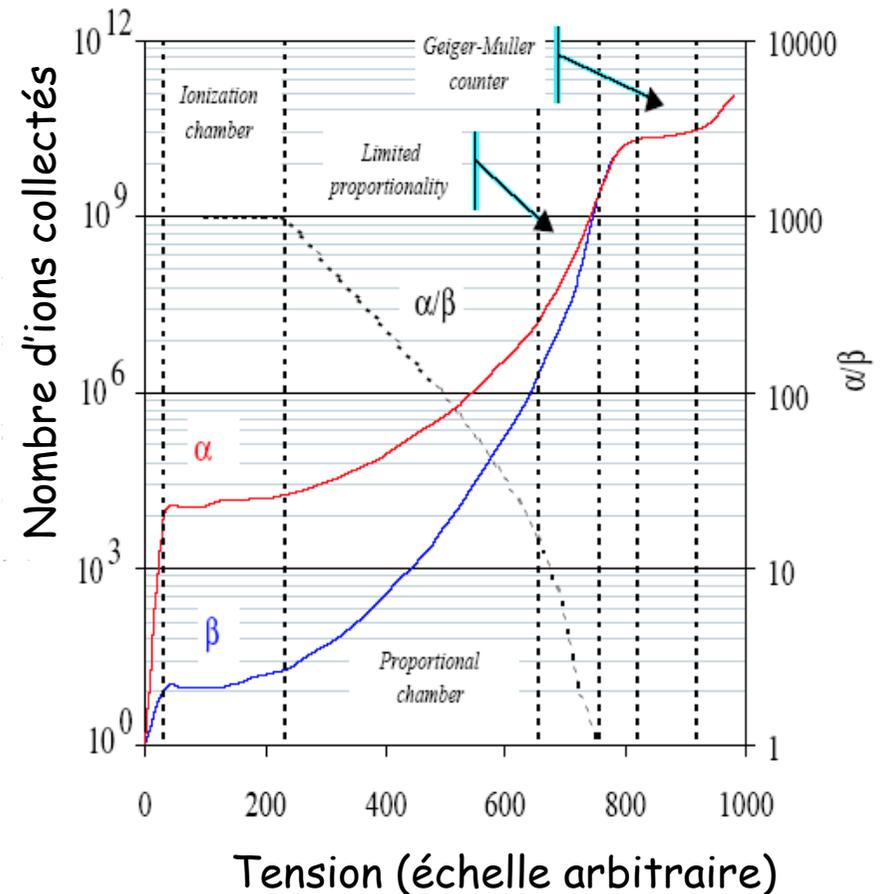
# Résumé sur les détecteurs à ionisation

- Il existe plusieurs types de détecteurs liés à divers modes de fonctionnement :
  - Recombinaison (inutile)
  - **Chambres à ionisation** :
    - Toute la charge initiale est recueillie sans amplification
    - Gain  $\approx 1$
  - **Compteurs proportionnels**
    - Le champ  $E$  est suffisamment fort pour induire des avalanches secondaires
    - Gain  $\approx 10^4-10^5$



Nombre d'ions collectés pour des  $\alpha$  et des électrons

- **Compteurs proportionnels saturés**
  - Champ  $E$  encore plus élevé
  - HT pulsée
  - Gain  $\approx 10^8$ - $10^9$
  
- **Compteurs Geiger Muller**
  - Tout le fil d'anode est affecté
  - Coupure de la HT pour arrêter le processus

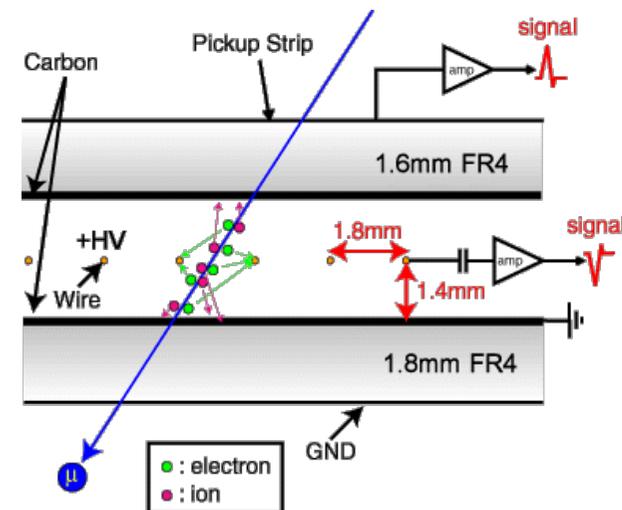


Nombre d'ions collectés pour des  $\alpha$  et des électrons

# Un exemple en mode saturé : les TGC

- **TGC** ≡ **T**hin **G**ap **C**hamber
- Opération en mode saturé (entre les régimes proportionnel et Geiger)
- Temps de montée très bref (2 ns)
  - Utile pour faire un trigger !
- Accepte des taux de comptage élevés (jusqu'à  $10^6$  Hz)

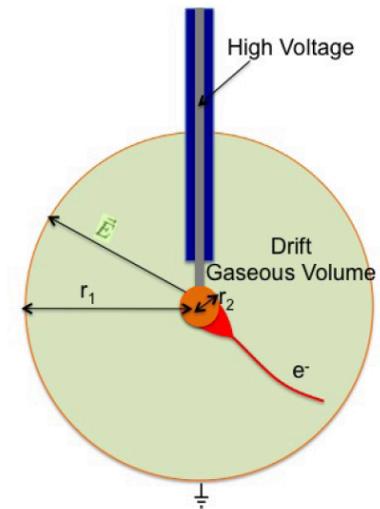
Utilisé par exemple pour les muons trigger de ATLAS



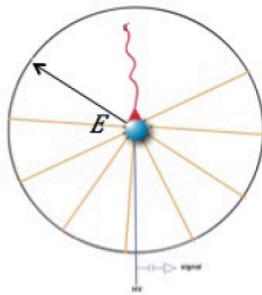
# Cas d'une géométrie sphérique : SEDINE

- **SPC**  $\equiv$  **S**pherical **P**roportional **C**ounter
- Large volume de dérive - une seule voie de lecture
- Seuil en énergie très bas (indépendant du volume) à cause d'une très basse capacité
- Optimisé pour la recherche d'événements rares à bas seuil (recherche de WIMPS)
- Technique utilisée également par l'expérience R2D2

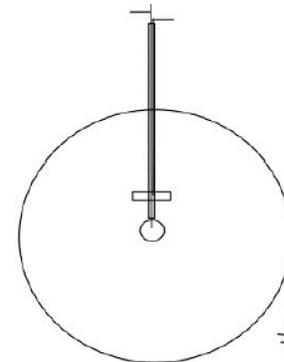
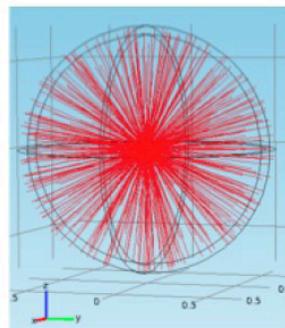
A. Dastgheibi Fard



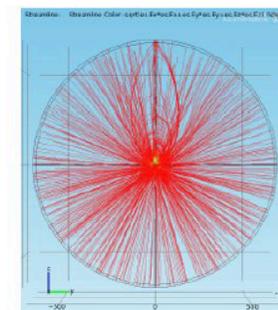
Principe de SEDINE,  
au LSM



Situation idéale



Avec disque correcteur



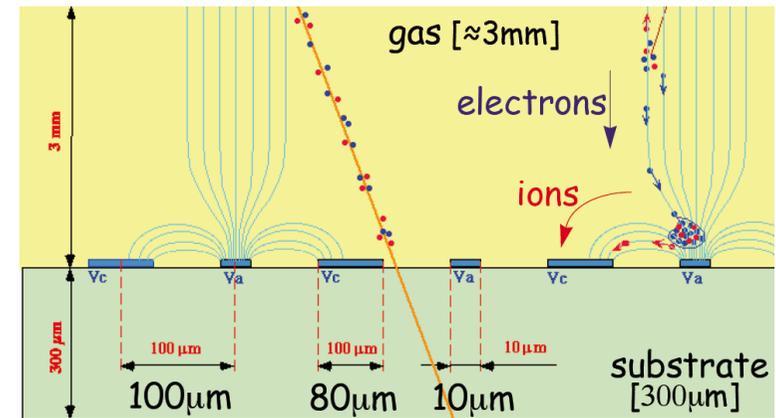
# Les évolutions

- Les détecteurs basés sur des structures à fils sont limités par des processus de diffusion et des effets de charge d'espace à des résolutions de 50 à 100  $\mu\text{m}$
- Les techniques modernes de microélectronique ont permis de franchir un cap en diminuant considérablement la taille des cellules
- En utilisant des granularités de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{m}$  (un ordre de grandeur plus petit qu'une distance typique entre fils), ces détecteurs offrent a priori des capacités de flux très élevées ( $> 10^6$  Hz/mm<sup>2</sup>) et une excellente résolution spatiale ( $\approx 30$   $\mu\text{m}$ )

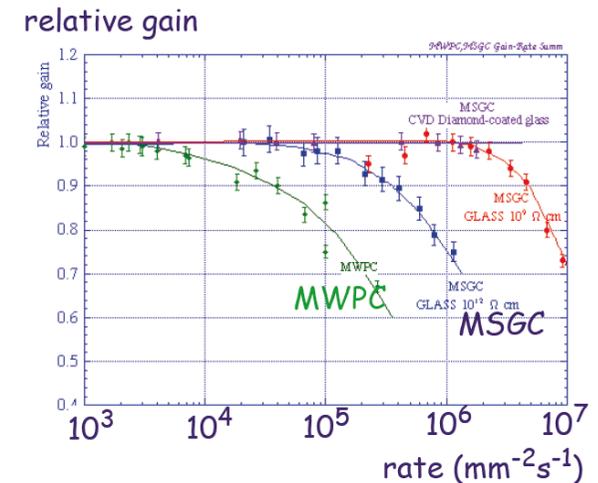
# Extension récente : MSGC

C. Niebuhr

- **MSGC** ≡ **M**icro **S**trip **G**as **C**hamber
- Segmentation fine ( $\approx 3\text{-}5\text{ mm}$ )
  - Pas de fils fragiles !
  - Substrat en verre (pas de silicium) : **insensible aux radiations** et forte rigidité mécanique
  - Basé sur les technologies de la microélectronique : **bonne résolution spatiale**
  - Faible distance de dérive des ions : fort taux de comptage possible



MSGC typique

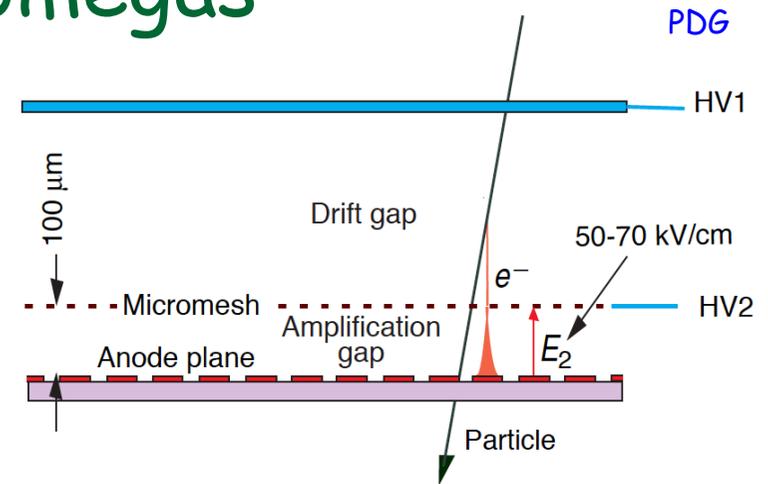


Taux de comptage pour des MWPC et des MSGC

# Extension récente : Micromegas

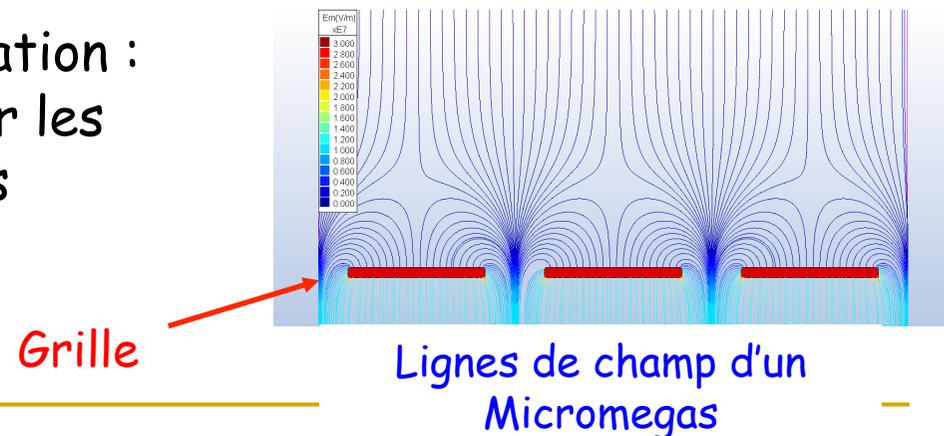
- **Micromegas** ≡ **MICRO MESH**  
**GAS**eous Detector

- Principe :
  - Une grille pour découpler la région de dérive des  $e^-$  de la zone d'amplification et pour récupérer les ions
  - Faible zone pour l'amplification : pas de pads pour récupérer les ions pouvant provoquer des décharges vers les anodes



Micromegas typique

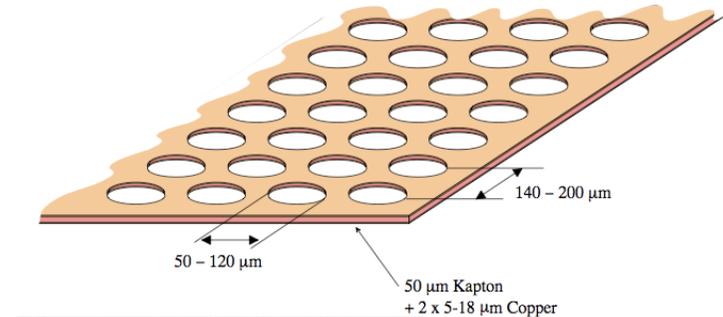
E. Ferrer-Ribas



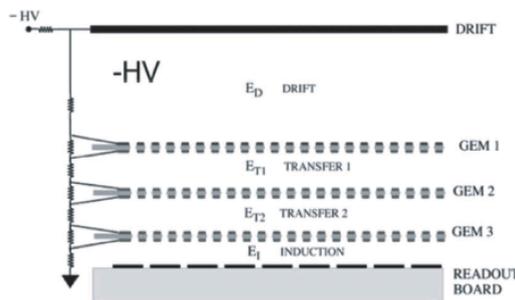
# Extension récente : GEM

- **GEM** ≡ **G**as **E**lectron **M**ultiplier (1988)
  - Feuille Cu-Kapton-Cu percée régulièrement de trous de 30-50  $\mu\text{m}$
  - 200 à 400 V entre les 2 faces
  - 100 à 1000  $e^-$  produits par un  $e^-$  unique à l'entrée d'un trou
  - Grandes surfaces possibles
  - Possibilité d'un système en « mille-feuille »

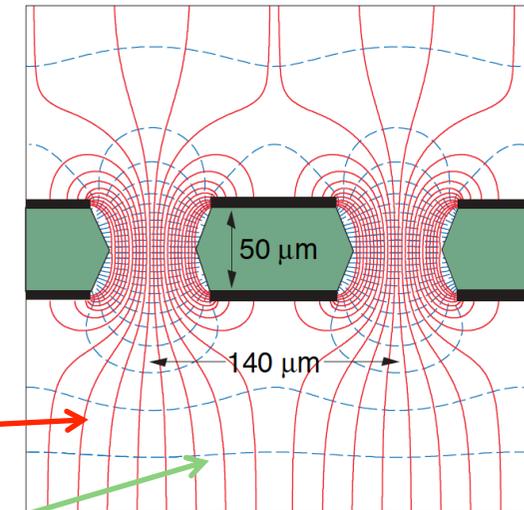
(R. Bouclier et al., NIM A 396 (1997) 50)



Détecteur à muons de LHCb



PDG



Lignes de champ

Equipotentielles

Lignes de champ pour un GEM

---

# 2<sup>e</sup> partie : Détection des particules

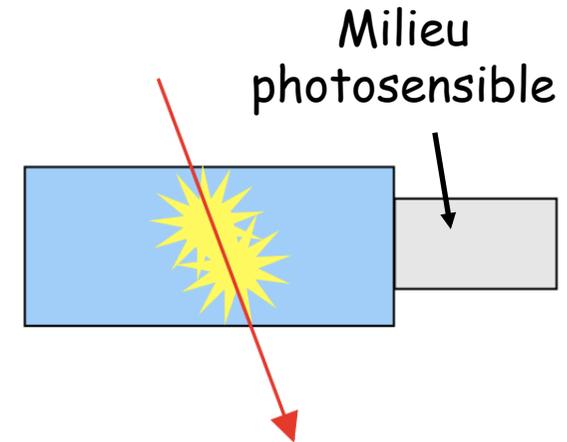
## I. Particules chargées

- 1) Détecteurs à ionisation
- 2) **Détecteurs à scintillation**
- 3) Détecteurs à semi-conducteurs
- 4) Techniques « exotiques »

## II. Photons

# Détecteurs à scintillation

- Certains milieux transparents émettent un peu de lumière après excitation par une particule chargée (fluorescence ou phosphorescence)

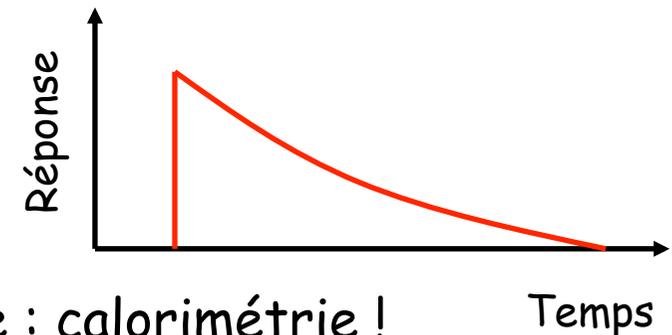


- Rappels :
  - L'émission d'un photon par un atome est due à un retour vers un état plus fondamental d'un électron sur un état excité de l'atome
  - On parle d'**incandescence** quand le mode d'excitation du noyau est le chauffage, et de **luminescence** dans les autres cas
  - Quand l'émission du  $\gamma$  suit immédiatement l'excitation, on parle de **fluorescence** et de **phosphorescence** quand il y a un délai

- Ces photons peuvent être détectés par un milieu photosensible qui doit être transparent à la longueur d'onde du rayonnement
- On considèrera deux types de matériaux :
  - **Les scintillateurs inorganiques**
    - Milieux denses, bon rendement, relativement lents
    - Idéal pour la détection de particules chargées et de  $\gamma$
    - Chers !
  - **Les scintillateurs organiques**
    - Milieux légers, faible rendement, relativement rapides
    - Faible efficacité de détection des  $\gamma$
    - Très bon marché !

- Le temps de montée du signal est très rapide (1-2 ns) et surtout plus rapide que les détecteurs d'ionisation
  - Systèmes de déclenchement et mesures de temps de vol

- La décroissance est au contraire très lente (constante de temps  $\approx$  100-200 ns)



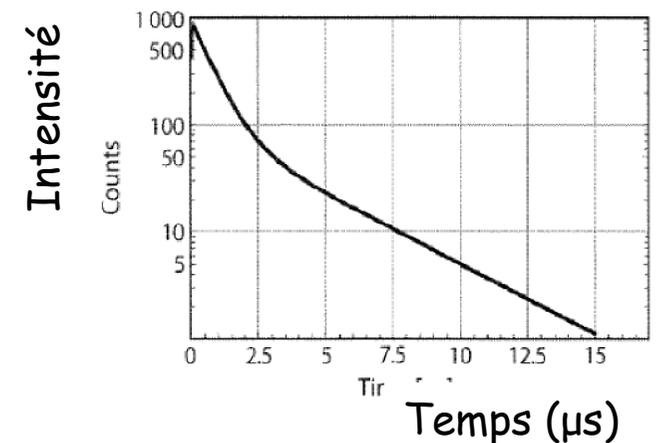
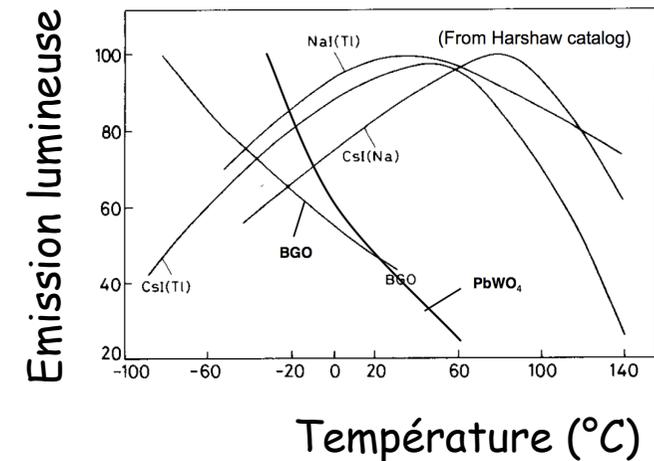
- Réponse linéaire sauf à très basse énergie : calorimétrie !
- Les photons doivent traverser le milieu pour atteindre la zone photosensible. Le nombre de photons transmis est :

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad \lambda : \text{longueur d'atténuation}$$

- Pour des détecteurs de grande dimension, il faut  $\lambda \approx 1$  m ou plus

# Scintillateurs inorganiques

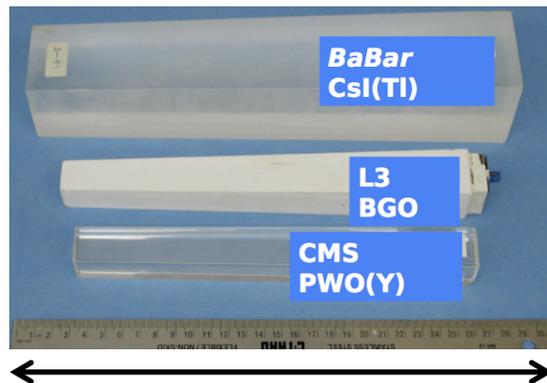
- Le mécanisme de la fluorescence est dû aux états intermédiaires des impuretés du milieu
- Principalement des **cristaux** : (NaI, BaF<sub>2</sub>, BGO, PbWO<sub>4</sub>, ..)
  - Très forte dépendance avec la température
  - 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> photons/MeV, sauf pour PbWO<sub>4</sub> (≈ 100)
  - Souvent plusieurs constantes de temps (de 1-2 ns à 100 ms) et plusieurs longueurs d'onde (typiquement 200-500 nm)



Intensité de scintillation pour des  $\gamma$  dans un cristal CsI:TI

	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\tau_{decay}$ ns	$\lambda_{max}$ nm	$n$	Light yield Photons/MeV
NaI(Tl)	3.67	245	410	1.85	40000
CsI(Tl)	4.51	1220	550	1.79	65000
CsI(Na)	4.51	690	420	1.84	35000
CsI(pure)	4.51	30	310	1.95	1400
BaF <sub>2</sub>	4.89	650	300	1.50	1500
BaF <sub>2</sub>	4.89	0.9	220	1.50	10000
BGO	7.13	300	480	2.15	4000
PbWO <sub>4</sub>	8.30	30	425	2.20	780
PbWO <sub>4</sub>	8.30	10	420	2.20	200

Principales propriétés des cristaux les plus utilisés



30 cm

BaBar: CsI(Tl) : 16  $X_0$

L3: BGO : 22  $X_0$

CMS: PbWO(Y) : 25  $X_0$

# Scintillateurs organiques

- Principalement plastique
  - La base, (par exemple styrène ou vinyltoluène), scintille dans l'UV. Typiquement, 1 photon est émis pour 100 eV déposés
  - Un MIP crée  $\approx 2 \cdot 10^4$  photons dans 1 cm de scintillateur
- Le libre parcours moyen de ces photons est de quelques mm
  - Impossible d'atteindre le détecteur de photons
- Un dopant (appelé **wavelength shifter (WLS)**, ou **fluor**) est ajouté (typiquement 1% de concentration)
  - Il absorbe les photons de scintillation et les re-émet rapidement ( $\approx 1$  ns) dans une longueur d'onde plus grande, donc plus propice à la détection (de 300 à 500 nm)

- Ce photon a un bien plus grand libre parcours moyen
- Parfois, un 2<sup>e</sup> fluor ( $\approx 0.05\%$  de concentration), est ajouté pour décaler encore plus la longueur d'onde

PDG

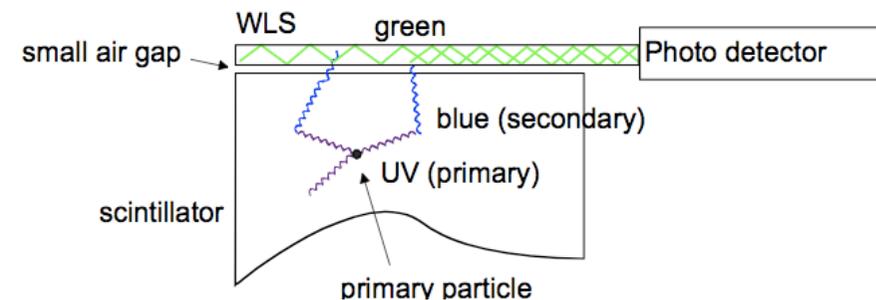
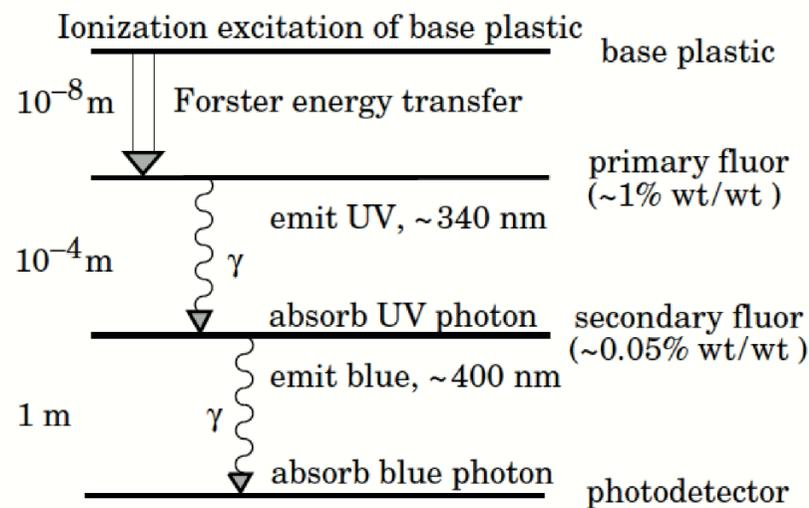


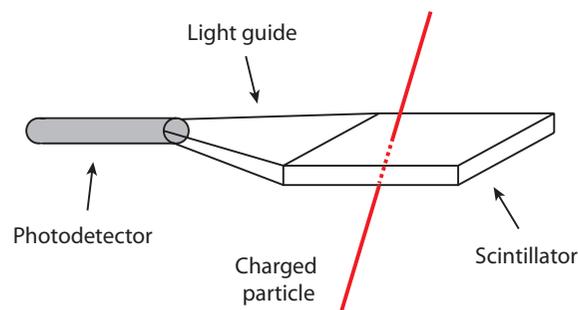
Schéma typique d'un WLS pour un scintillateur organique

- Un scintillateur est un mélange complexe de divers éléments

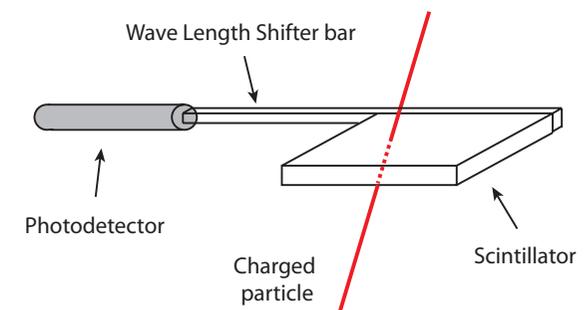
Quelques composés principaux et leurs dopants

	solvent	secondary fluor	tertiary fluor
Liquid scintillators	Benzene Toluene Xylene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP BBO BPO
Plastic scintillators	Polyvinylbenzene Polyvinyltoluene Polystyrene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP TBP BBO DPS

- Il faut ensuite amener les photons vers le photodétecteur à l'aide d'un guide de lumière (efficacité typique  $\approx 20-30\%$ )



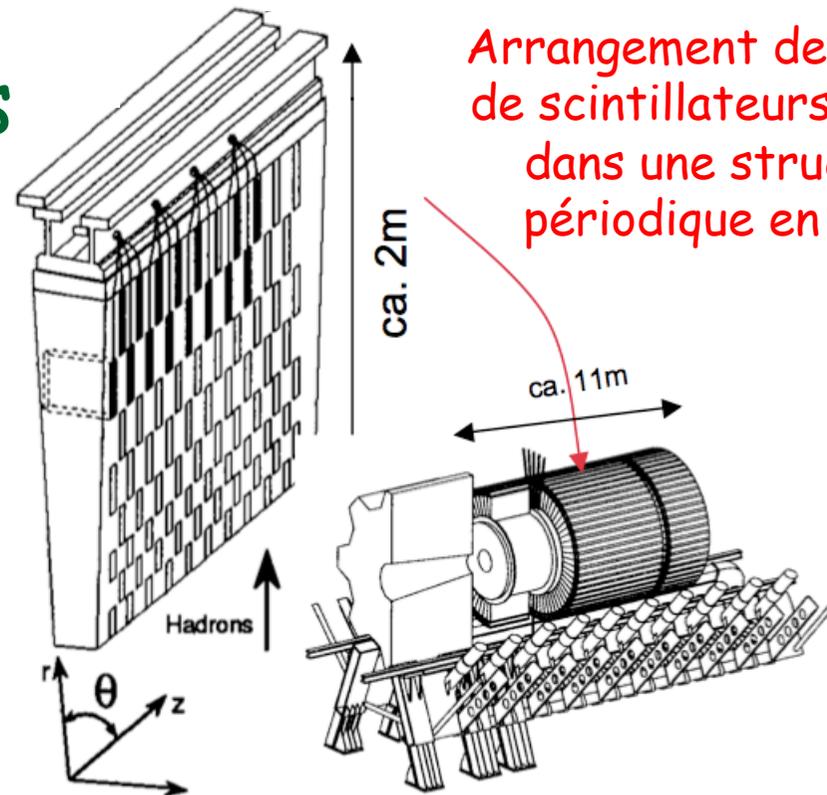
Exemples de guides de lumière



# Application : fibres scintillantes

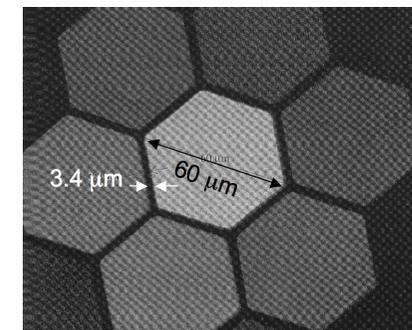
- Calorimétrie :

Exemple du calorimètre  
hadronique de ATLAS



Arrangement de plaques  
de scintillateurs (3 mm)  
dans une structure  
périodique en acier

- Tracking :
  - Fibres hexagonales, carrées, ...
  - On peut éviter tout crosstalk entre voies (métallisation des surfaces)



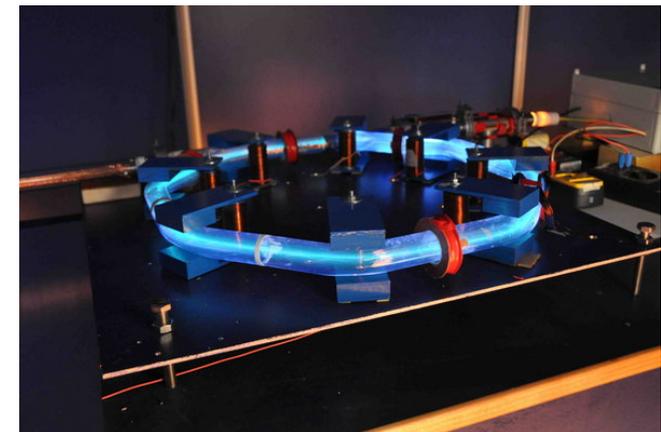
- La scintillation se produit également dans les gaz
- Dans la haute atmosphère,  $N_2$  émet du vert par interaction avec les particules chargées capturées par le champ magnétique terrestre
  - Aurores boréales
- Un autre exemple est *La ronde des Electrons (Science-ACO)* à Orsay

IPAG (Grenoble)



Aurore boréale

Sciences ACO (Orsay)



L'accélérateur sur table de Sciences ACO

---

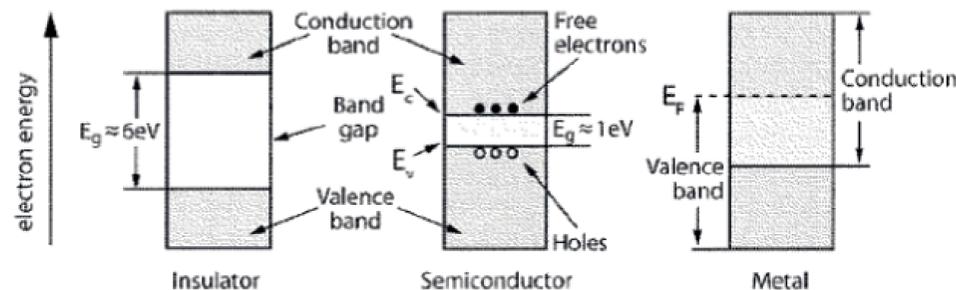
# 2<sup>e</sup> partie : Détection des particules

## I. Particules chargées

- 1) Détecteurs à ionisation
- 2) Détecteurs à scintillation
- 3) Détecteurs à semi-conducteurs
- 4) Techniques « exotiques »

## II. Photons

- Les détecteurs à semi-conducteurs forment un type particulier de détecteur à ionisation : au lieu d'exciter (ou d'ioniser) le milieu, une particule chargée qui traverse un semi-conducteur crée des paires e-/trous quasi libres
  - On applique un champ  $E$  pour collecter les charges
  
- Isolants qui peuvent transporter du courant
  - Intermédiaire entre isolant et conducteur



- On considèrera :
  - Le **silicium** : particules chargées et photons
  - Le **germanium** : photons
- Il faut  $\approx 3$  eV pour créer une paire e-/trou (pour Si et Ge), contre  $\approx 30$  eV pour un détecteur à ionisation et  $\approx 300$  eV pour un scintillateur !!

- Avantages :
  - Très bonne **résolution** en énergie (sans égale à basse énergie)
  - **Détecteur compact** (puisque solide)
    - Bon candidat pour un détecteur de trace
  - Très bonne **linéarité** en énergie
    - Sauf pour les particules très ionisantes (ions lourds) pour lesquelles des effets de charge d'espace limitent la résolution
  - **Temps de montée**  $\approx$  quelques ns
- Inconvénients :
  - Coût, fragilité, sensibilité aux radiations

# DéTECTEURS Silicium

- Avantage : le Si est très abondant sur Terre
- Peut être manipulé par les techniques de la microélectronique
- Très haute densité ( $2,33 \text{ g/cm}^3$ ) : un MIP va créer  $\approx 100$  paires  $e^-/\text{trou}$  par  $\mu\text{m}$ 
  - Épaisseur typique  $300 \mu\text{m} \Rightarrow 3 \cdot 10^4$  paires  $e^-/\text{trou}$  en moyenne
- Inconvénients :
  - Pas de mécanisme de multiplication de la charge
  - Coût, sensibilité aux radiations

C. Joram

- L'énergie déposée par  $dE/dx$  crée des paires  $e^-/ions$
- Les électrons dérivent d'un côté, et les trous de l'autre

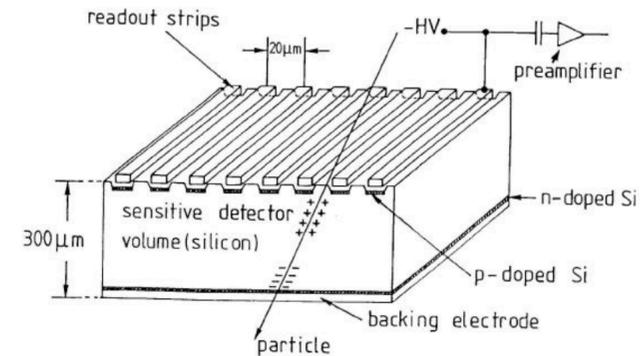


Schéma de principe d'un détecteur microstrip à simple face

Système de lecture d'un détecteur microstrip à simple face

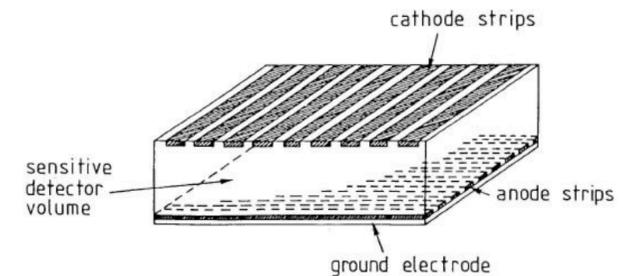
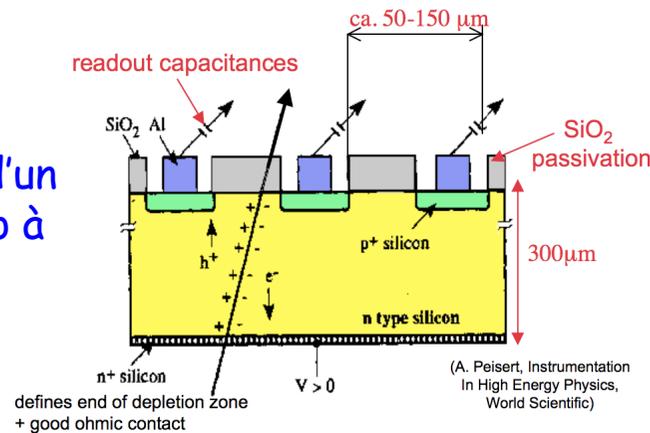
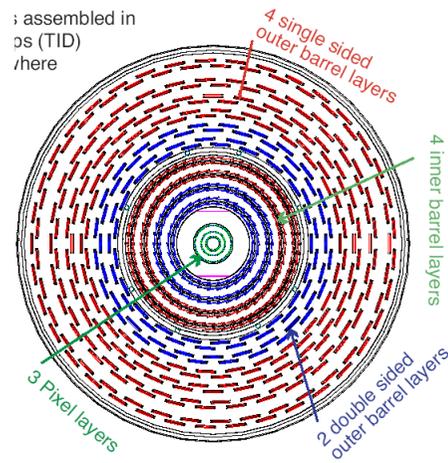
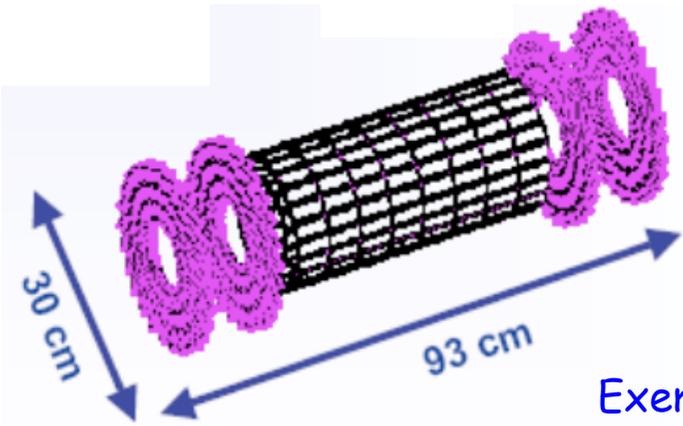
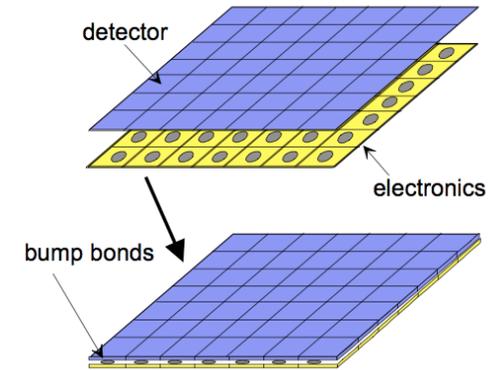


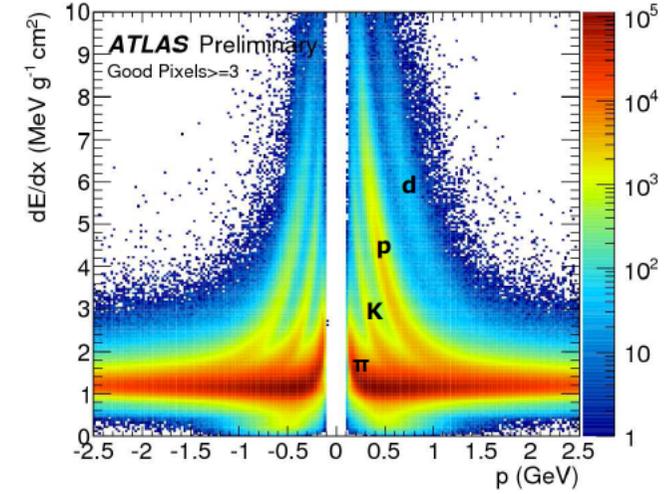
Schéma de principe d'un détecteur microstrip à double face

# Détecteur pixel

- On segmente le Si en une matrice. L'électronique de lecture devra être segmentée de la même manière
- Utilisé de manière intensive pour les détecteurs de traces d'ATLAS, ALICE et CMS



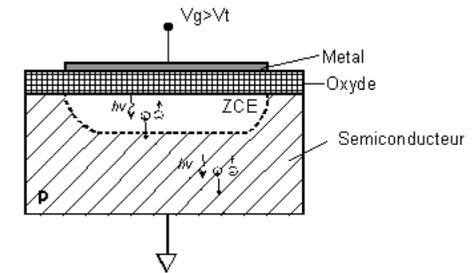
Exemple du tracker de CMS



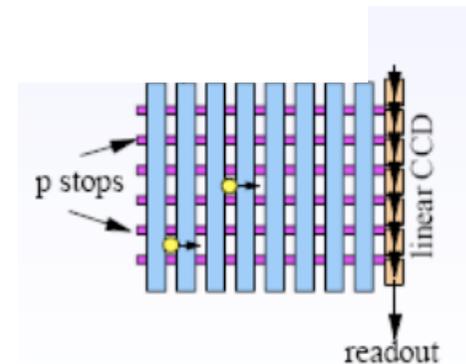
dE/dx dans le détecteur pixel d'ATLAS

# Capteurs CCD

- **CCD**  $\equiv$  **C**harge **C**ouple **D**evice : photodétecteur à transfert de charges
  - Détection des photons (paires  $e^-$ -trou)
  - Accumulation des charges dans des capacités MOS (Metal Oxyde Semiconductor)
  - On transfère ensuite les charges accumulées dans une cellule vers sa voisine
  
- Lecture des canaux en série
  - 2000  $e^-$  uniquement, mais temps de lecture élevé
  
- Bon marché car commercial (et linéaire !)



Cellule individuelle CCD

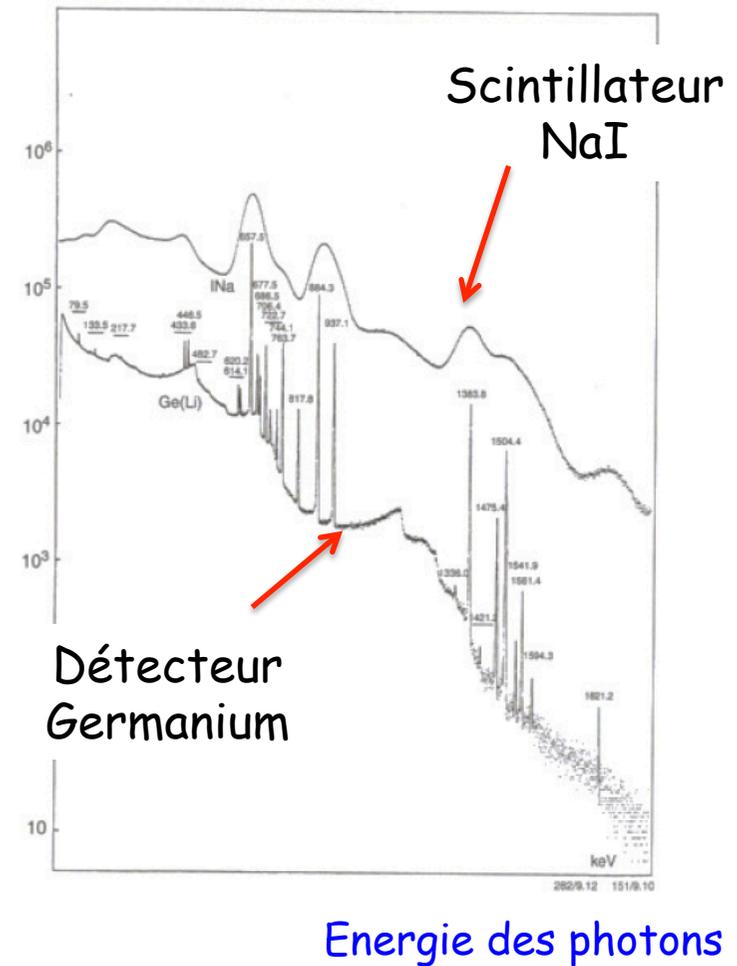
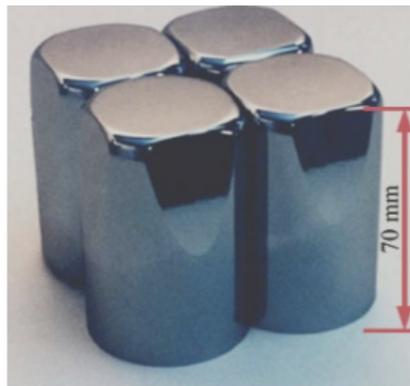


Détecteur CCD

# Détecteur au germanium

- Photons uniquement
- Excellente résolution
- Peut être très compact

Euroball



- Mais très cher

---

# 2<sup>e</sup> partie : Détection des particules

## I. Particules chargées

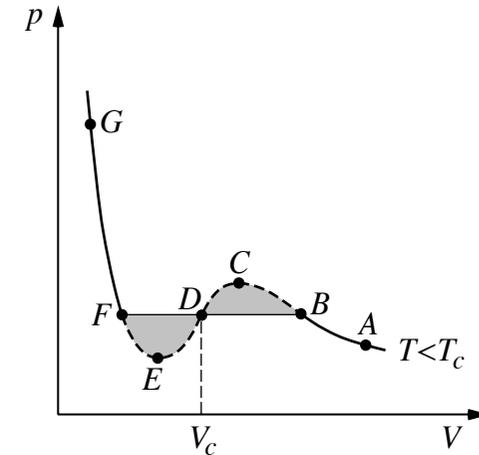
- 1) Détecteurs à ionisation
- 2) Détecteurs à scintillation
- 3) Détecteurs à semi-conducteurs
- 4) Techniques « exotiques »

## II. Photons

- D'autres méthodes, principalement basées sur la photographie, ont été utilisées auparavant :
  - Chambres à brouillard
  - Chambres à bulles
  - Emulsions
- La plupart d'entre elles ne sont plus utilisées de nos jours

# Visualisation de traces dans une chambre à brouillard

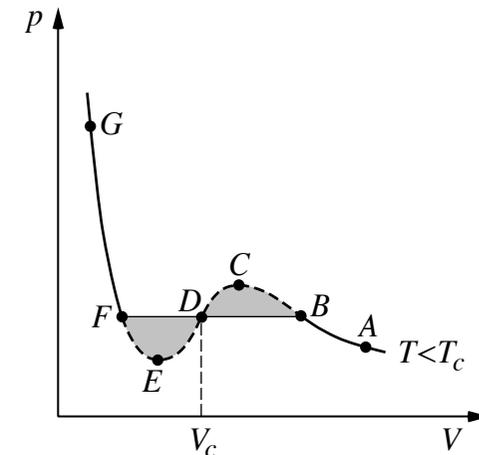
- Rappels de thermodynamique des états métastable :
  - AB et GF sont sur des **états stables**. Les transitions BC et FE sont des retards aux transitions de phase (**états métastables**)
  - BC correspond à de la vapeur sursaturée : la vapeur existe seule à une pression  $>$  à la pression d'équilibre liquide-vapeur.
  - Cette vapeur est instable et une très faible perturbation fait apparaître des gouttes de liquide dans le gaz
  
- **C'est le principe des chambres à brouillard où des particules chargées provoquent la formation de gouttelettes de liquide le long de leurs traces. Il n'y a plus qu'à prendre ensuite une photo !**



Construction de Maxwell du diagramme  $p=f(V)$  d'un fluide

# Visualisation de traces dans une chambre à bulles

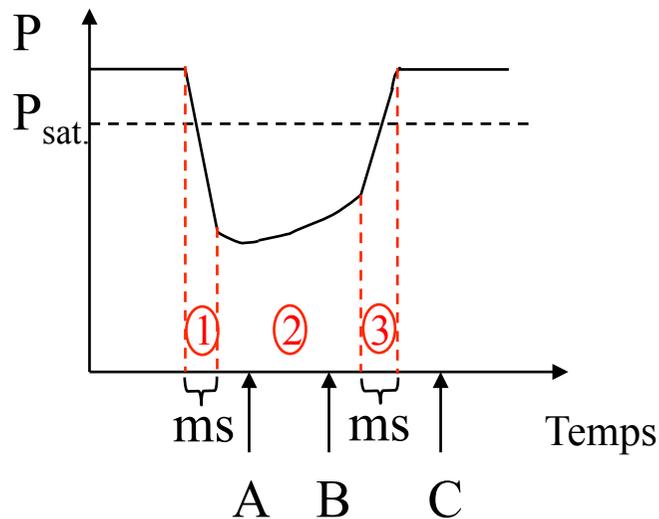
- Rappels de thermodynamique des états métastable :
  - FE correspond à du **liquide surchauffé** : le liquide existe seul à une pression inférieure à la pression d'équilibre liquide-vapeur
  - Ce liquide est instable et une très faible perturbation fait apparaître des bulles de vapeur dans le liquide
  
- **C'est le principe des chambres à bulles où des particules chargées provoquent la formation de bulles le long de leurs traces. Il n'y a plus qu'à prendre ensuite une photo !**



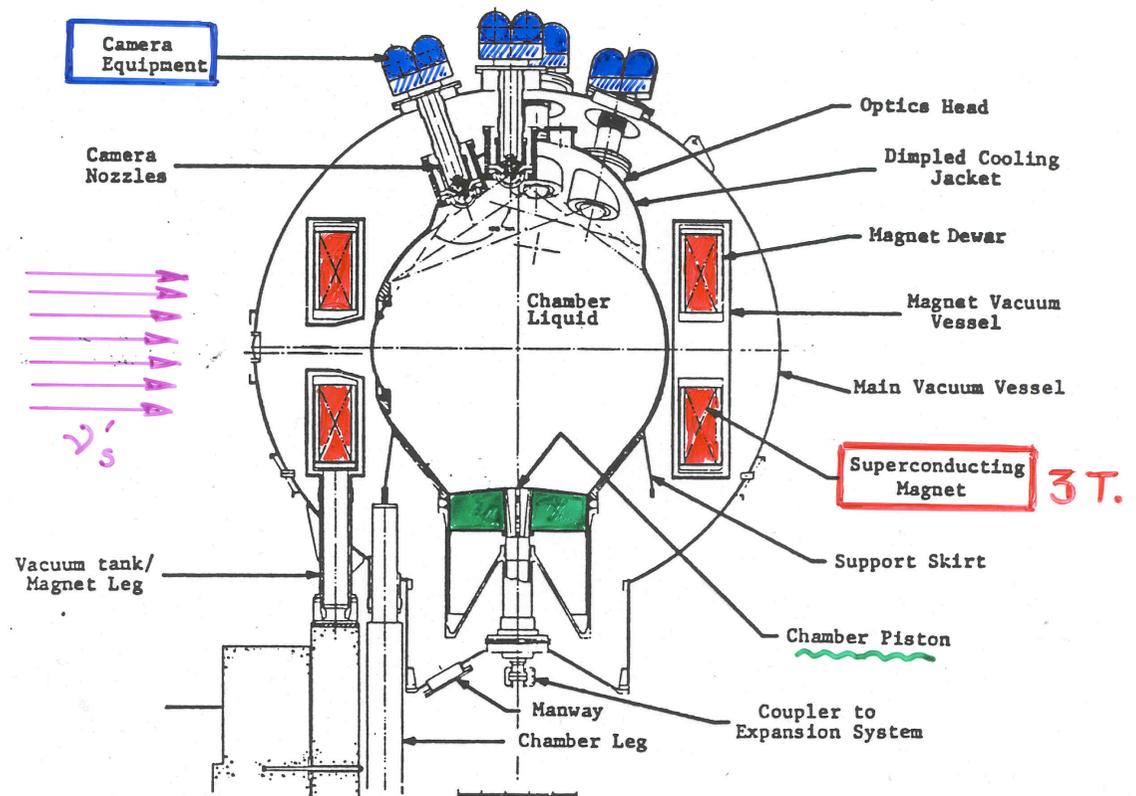
Construction de Maxwell du diagramme  $p=f(V)$  d'un fluide

# La chambre de 15' de Fermilab

- Fréquence de quelques dizaines de Hertz



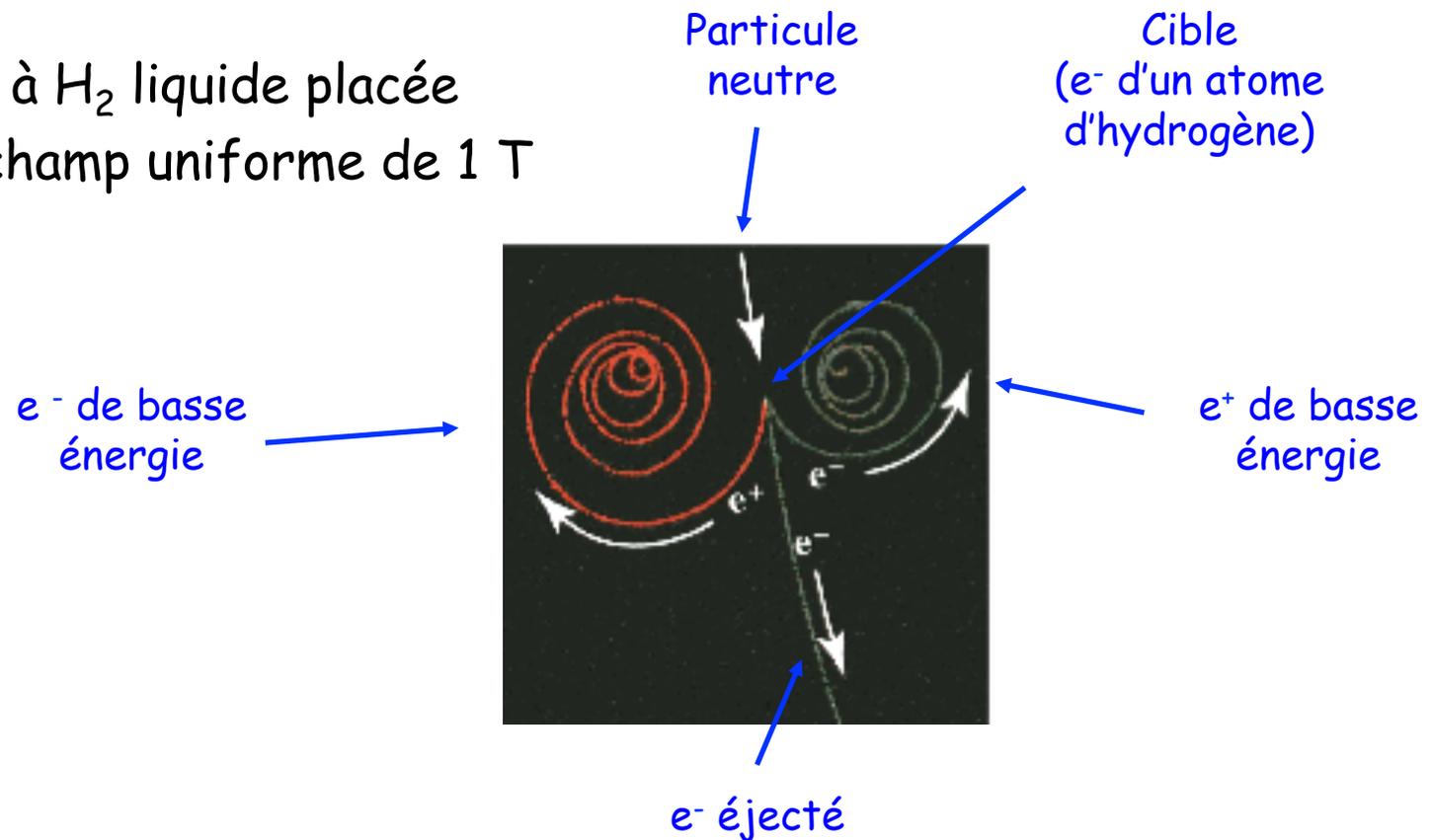
- ① Décompression
- ② Période de sensibilité  
A : arrivée du faisceau  
B : flash
- ③ Recompression  
C : avancement du film



La chambre de 15' de Fermilab (26 m<sup>3</sup>)

# Un exemple pédagogique ...

- Chambre à  $H_2$  liquide placée dans un champ uniforme de 1 T



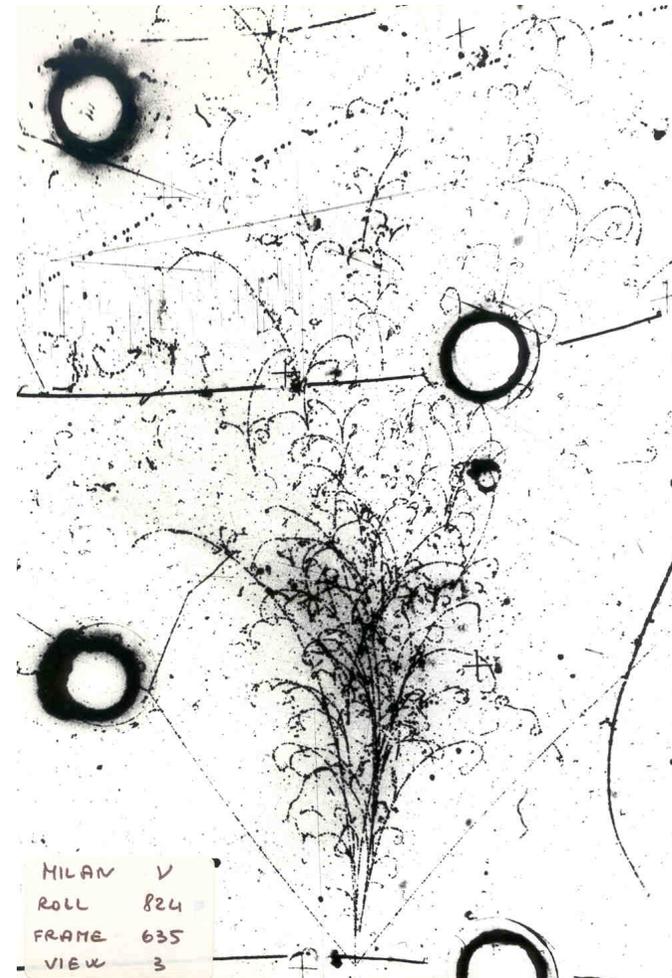
- Traces observées jusqu'au seuil de détection (mesurable) : le rayon de courbure des traces diminue

# La réalité : la chambre de 15' de Fermilab

Pas forcément simple à interpréter



Un exemple de Fermilab



# Emulsions

- Les émulsions nucléaires sont faites d'une petite couche d'halogénure (AgBr ou AgCl) déposée sur un substrat en gélatine

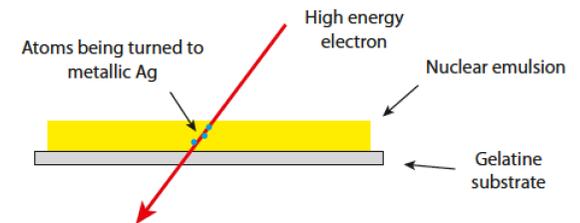


Schéma d'une émulsion

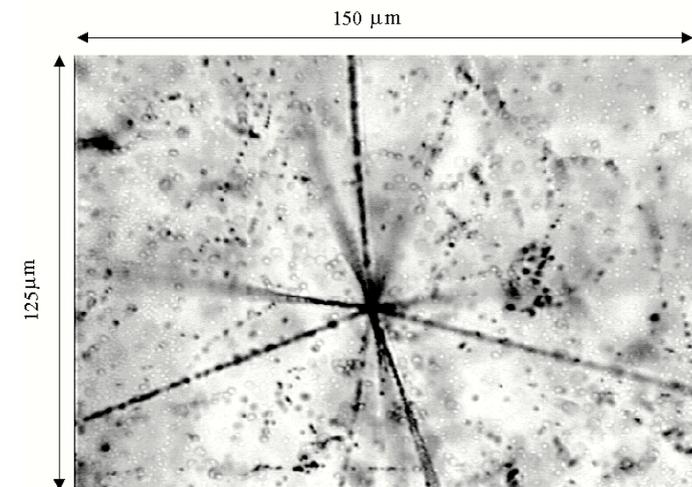
- Principe:
  - Une particule chargée crée de l'ionisation
  - Certaines molécules interagissent. Production d'argent métallique
  - Une émulsion peut être exposée au faisceau pendant très longtemps. Puis tout est démonté et l'analyse peut commencer
  - Les traces en argent sont attaquées chimiquement et révélées par un processus semblable au développement d'une photographie

# CHORUS (1/2)

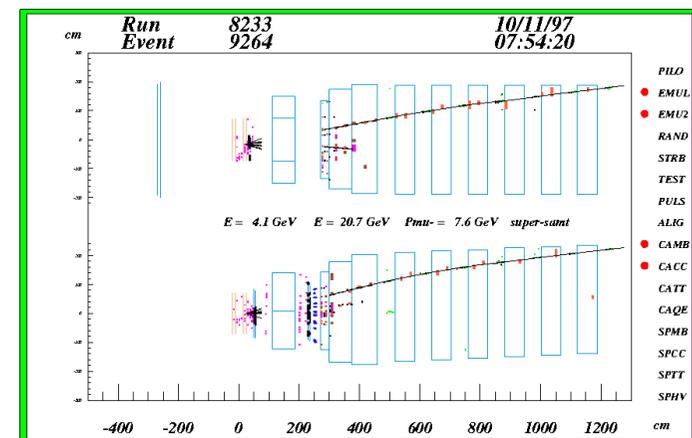
- **CHORUS** ≡ **CERN Hybrid Oscillation Research apparatus** (1994 - 1997) : recherche des oscillations  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$
- Utilise des émulsions très particulières (gélatine + AgBr + I + ...) qui sont exposées pendant environ un an au faisceau de neutrinos. Les émulsions sont sensibles :
  - Au faisceau de neutrinos et aux particules chargées générées par l'interaction des neutrinos
  - Au faisceau de  $\pi$  utilisé pour la calibration
  - Aux muons cosmiques (impossible à supprimer par le trigger)
  - A la radioactivité ambiante (idem)
- L'ensemble est ensuite développé

# CHORUS (2/2)

- Chaque image (il y en a  $10^{13}$  !) est étudiée au microscope (x 50)
- Les différences de brillance sont liées à la focalisation du microscope qui n'est que de quelques microns. On peut ainsi déterminer la profondeur à laquelle a eu lieu l'interaction
- Toutes les traces sont ensuite assemblées pour reconstituer les événements globaux



Une image de CHORUS



Un événement

- De nos jours, les émulsions sont toujours utilisées à cause de leur résolution inégalée

Particules  $\alpha$  issues d'un sel d'uranium déposé à la surface d'une émulsion. La surface est  $\approx 0.2 \times 0.3 \text{ mm}^2$

