

Ecole Internationale Joliot-Curie
Seignosse , 22-27 Septembre 2008

Principes & Techniques
de la détection

Joël Pouthas IPN Orsay
pouthas@ipno.in2p3.fr

Détection

repose sur :

Propriétés d'une charge électrique en mouvement dans un milieu *
(Phénomènes électromagnétiques)

Particules chargées

Particules "lourdes" (Masse \gg masse électron)
Electrons

Particules neutres

Mise en mouvement d'une particule chargée
Réactions \longrightarrow détection de "secondaires"

Cas des photons

Mise en mouvement d'électrons :
Effet Compton ; Effet photoélectrique ; Création de paires

Remarque : A haute énergie, phénomènes successifs en cascades

*Exceptions : Détecteurs "thermiques"
Chambre à brouillard, à bulles (obsolètes)
Bolomètres (mesures à très basse température)

→ Utilisation

Type de mesure : énergie, temps, position
Finalité : identification de particules...

→ Principes de fonctionnement

Ionisation du milieu
Emission de lumière

→ Nature

Gaz
Semi-conducteur...

→ Aussi fonction de :

Nature et énergie (ou impulsion) des particules

chargée : électron ou lourd (proton, noyau...)
neutre : neutron, π^0
photon : X ou gamma

En mode impulsionnel

Effacité de détection
Dynamique (seuil, saturation)

Résolution des mesures
en énergie
en temps
en position

Étalonnage (Calibration en anglais)

Temps mort

Remarque :

Il existe des détecteurs qui ne sont pas utilisés en mode impulsionnel, mais

- en courant moyen (détecteurs de faisceau)
- en intégration sur une période (dosimètres)

Détecteurs à ionisation

Ionisation : création de paires

électron / ion (gaz)

électron / trou (semi-conducteur)

Déplacement des charges électriques créées (-> Signal électrique)

Amplification (interne, externe)

Détecteurs à émission de lumière

Emission de lumière (retour à l'équilibre du milieu)

Scintillateurs

Effet Cerenkov

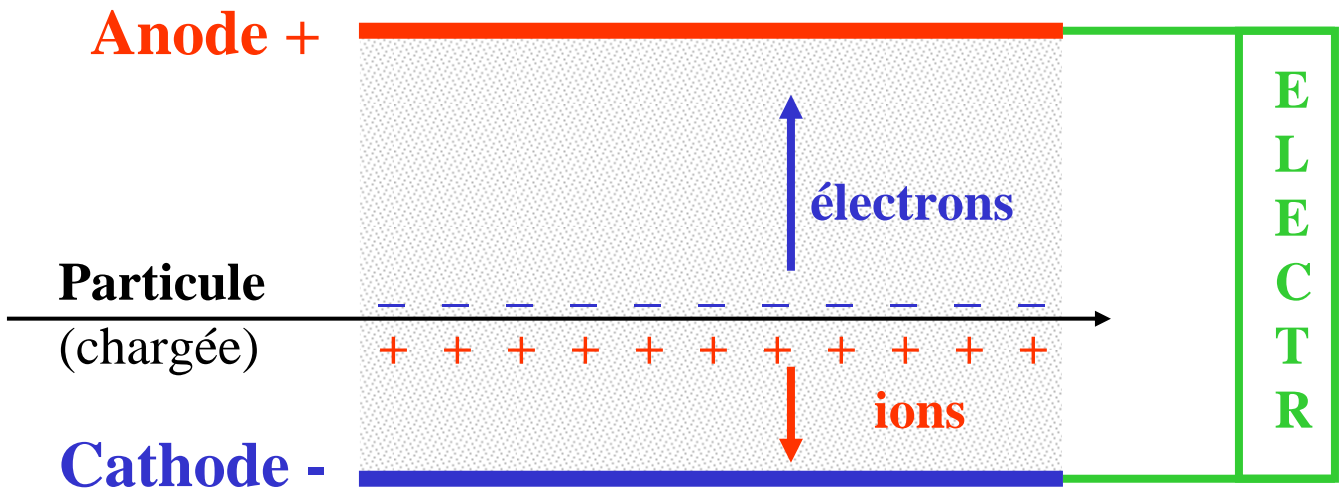
Collection de la lumière

Photo-détecteur : transformation en signal électrique

Remarque :

La notion de détecteur au sens large contient d'autres phénomènes comme, par exemple, la déviation dans un champ magnétique

Principes des détecteurs gazeux à ionisation



1. Ionisation

Création de paires électrons / ions

2. Mouvement des électrons et des ions

Déplacement dans le champ électrique

3. Multiplication

Avalanche dans le gaz (si champ fort)

4. Influence sur les électrodes

Création du signal

5. Electronique de lecture

Traitement du signal

1. Ionisation

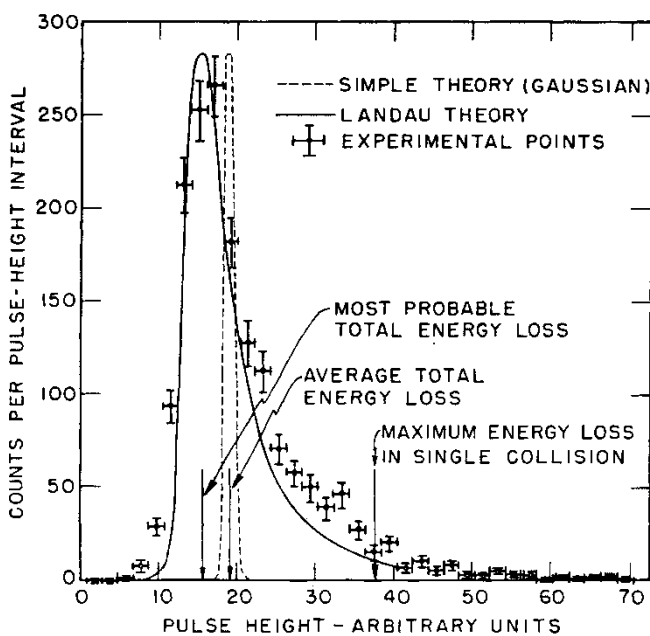
Création d'une paire électron / ion

	Excitation potential [eV]	Ionization potential [eV]	Mean energy for ion-electron pair creation [eV]
H ₂	10.8	15.4	37
He	19.8	24.6	41
N ₂	8.1	15.5	35
O ₂	7.9	12.2	31
Ne	16.6	21.6	36
Ar	11.6	15.8	26
Kr	10.0	14.0	24
Xe	8.4	12.1	22
CO ₂	10.0	13.7	33
CH ₄		13.1	28
C ₄ H ₁₀		10.8	23

Energie moyenne : $\cong 30$ eV

Mais...

pour des "m.i.p." et des "DéTECTEURS minces"



Fluctuations

(Distribution de Landau)

et "Clusters"

2. Mouvement des électrons et des ions

Ions

$$\text{Vitesse : } V = \mu \cdot E / p$$

p : pression du gaz

μ , mobilité dans le gaz

A pression normale :

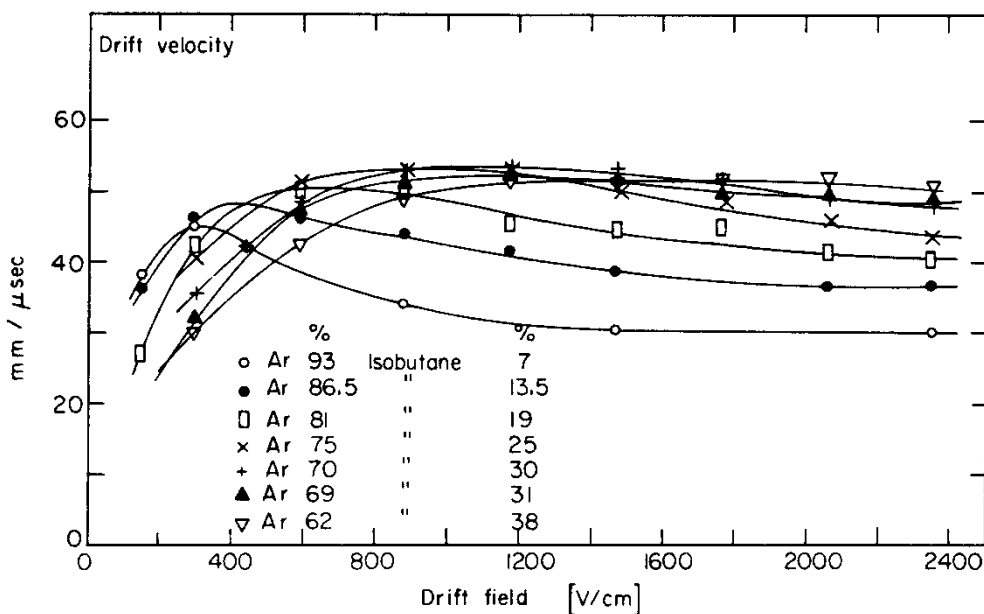
μ : environ $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$

V faible : 10 mm/ms ($E = 1 \text{ kV/cm}$)

Electrons

μ dépend du champ électrique E

Vitesse : qqs mille fois celle des ions



Vitesse des électrons dans Argon / Isobutane (Pression normale)

3. Multiplication

Multiplication du nombre des électrons sur une distance d

Changement du nombre d'électrons N entre x et $x + dx$
 $dN = \alpha \cdot N \cdot dx$ où α est le premier coefficient de Townsend
($1/\alpha$ libre parcours moyen d'ionisation)

$$M = N / N_0 = \exp(\alpha \cdot d)$$

α de la forme $\alpha / p = A \cdot \exp(-B \cdot p / E)$
avec p pression et E champ électrique
 A et B paramètres dépendant du gaz

Pour un champ non uniforme, intégrer α sur le parcours

Multiplication limitée par
les phénomènes de décharge (étincelle)

Différents régimes

en fonction de

Mélange gazeux

Champ

Pression

Le signal est créé par

4. Influence sur les électrodes

et non par « collection des charges »

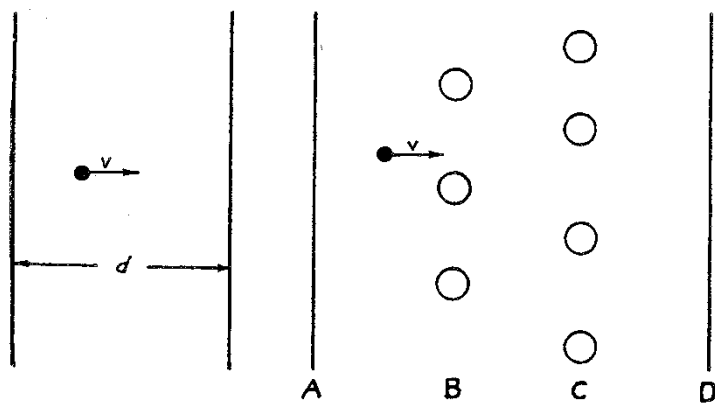


Fig. 1

Fig. 2

RAMO (1939)

Currents Induced
by Electron Motion

$$i_a = e \cdot v \cdot E_v$$

Théorème de Ramo

Dans un système à n électrodes,
la charge q_a induite sur l'électrode a
par une charge ponctuelle q en mouvement

est donnée par :

$$q_a = - q \cdot \varphi'_a(\mathbf{r})$$

et sa variation (dq_a/dt) ou courant induit i_a par :

$$i_a = q \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{E}'_a(\mathbf{r})$$

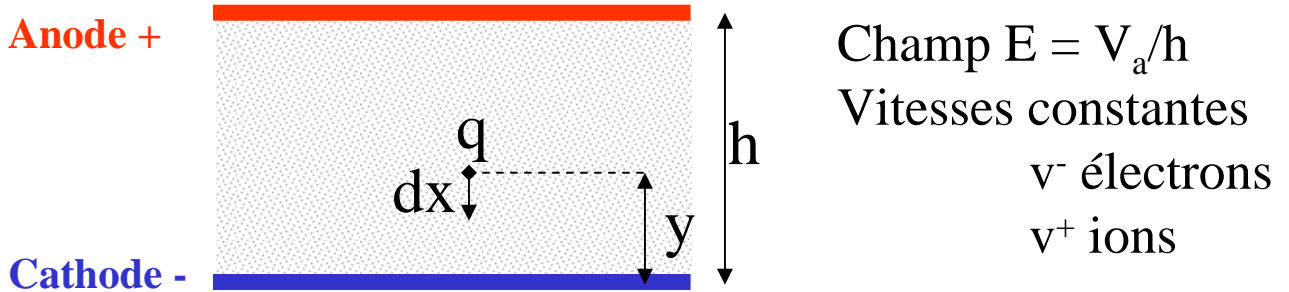
où \mathbf{v} est la vitesse instantanée de q

$\varphi'_a(\mathbf{r})$ et $\mathbf{E}'_a(\mathbf{r})$ sont les potentiels et les champs électriques qui
existeraient avec la charge q en \mathbf{r} , l'électrode a mise à un potentiel 1
et toutes les autres électrodes à un potentiel nul.

(Les caractères **en gras** sont des vecteurs).

4. Influence sur les électrodes

Exemple de la chambre d'ionisation



Variation de charge (dQ) pour un déplacement dx :

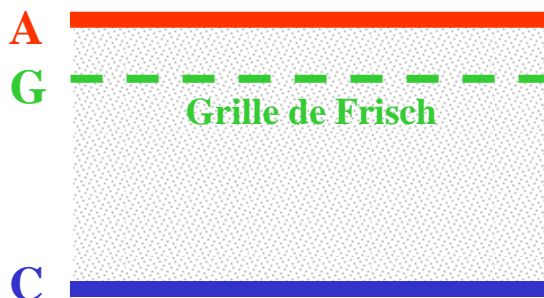
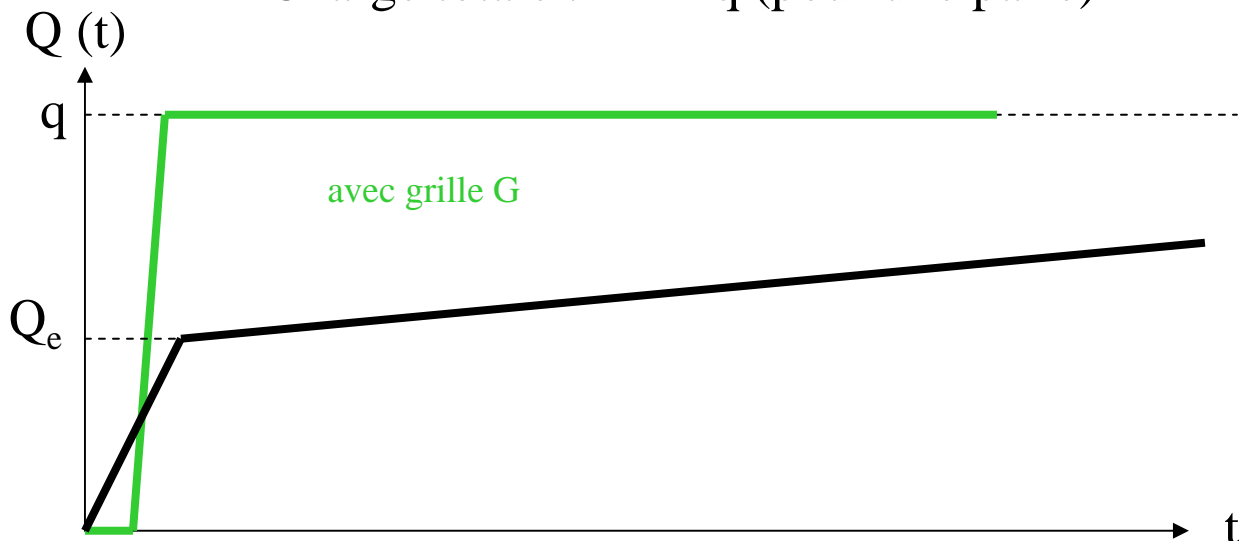
$$i = dQ/dt = q \cdot v \cdot E_{(\text{pour } V_a = 1)} = q \cdot (dx/dt) \cdot (1/h)$$

$$\text{et } dQ = q \cdot (1/h) \cdot dx$$

Charge due aux ions : $Q_i = q \cdot y/h$

Charge due aux électrons : $Q_e = q \cdot (h-y)/h$

Charge totale : q (pour une paire)



Avec la grille, le signal en A est créé par le déplacement des électrons entre G et A

5. Electronique de lecture

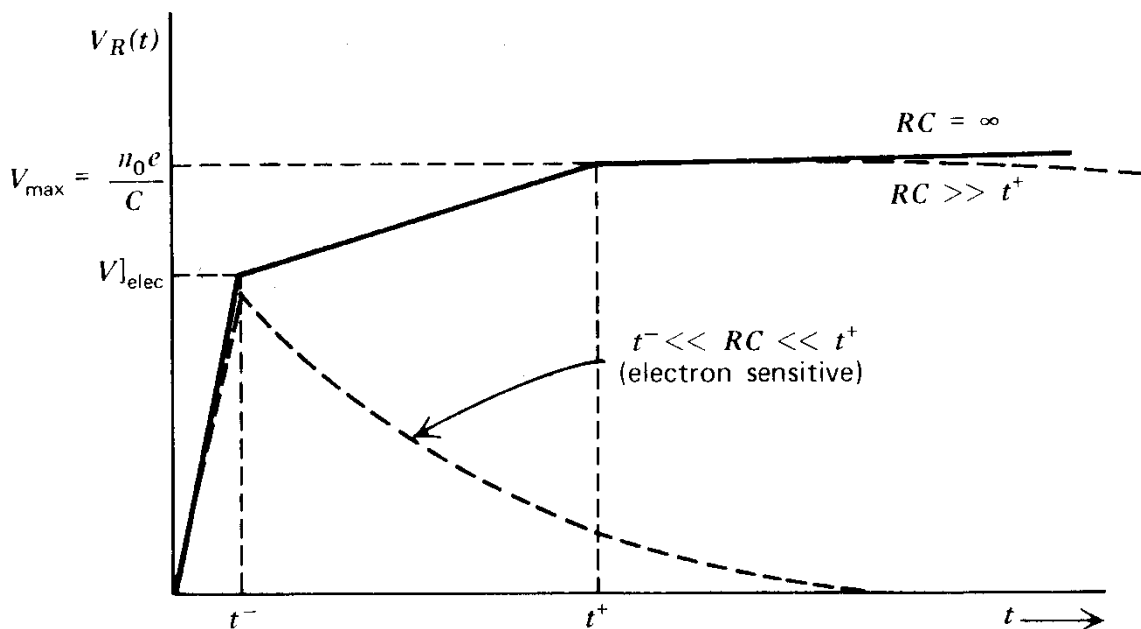
**L'électronique permet de « voir » le signal,
mais aussi de le filtrer**

Liaison au détecteur : en charge, en courant ou en tension

Filtrage : intégrations, différenciations

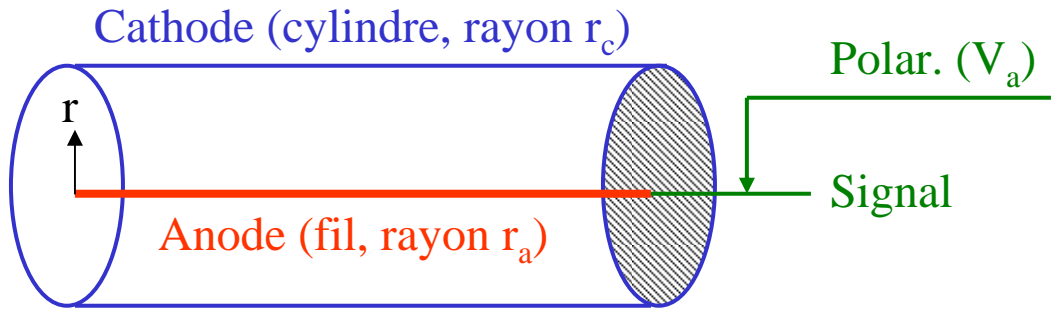
Plus généralement : fonction de transfert : $H(s)$

Exemple de la chambre d'ionisation

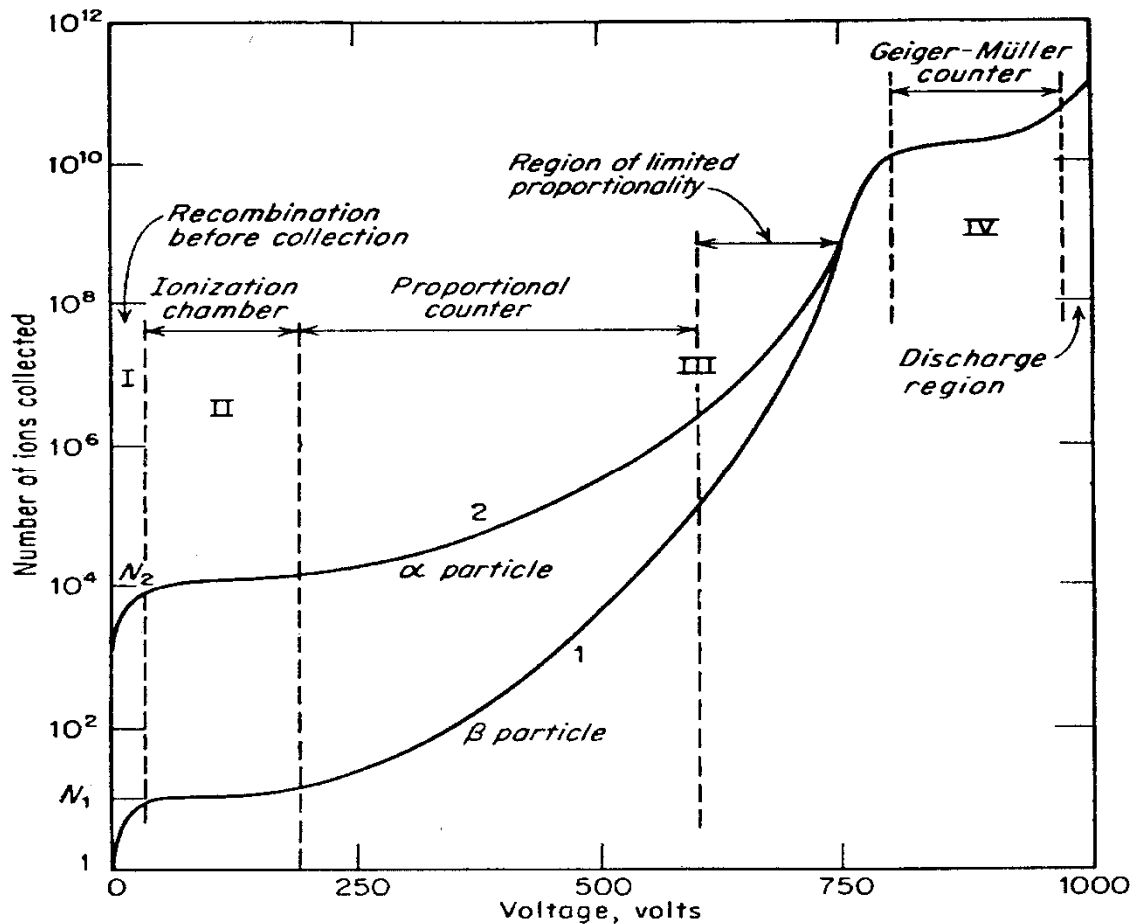


Lecture par un préamplificateur de charge :
Intégration des charges sur une capacité C
Différenciation de constante RC

Compteur proportionnel



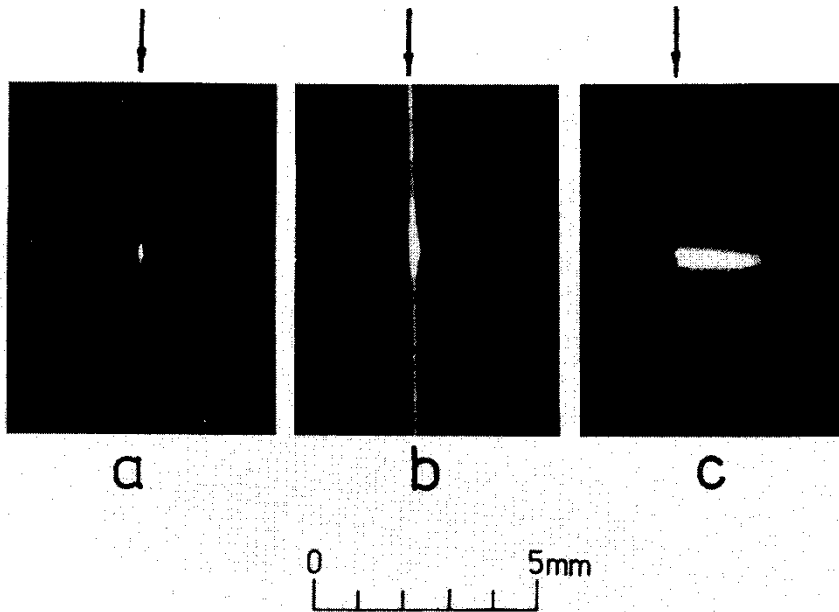
Champ électrique : $E (r) = V_a / r \cdot \log r_c / r_a$



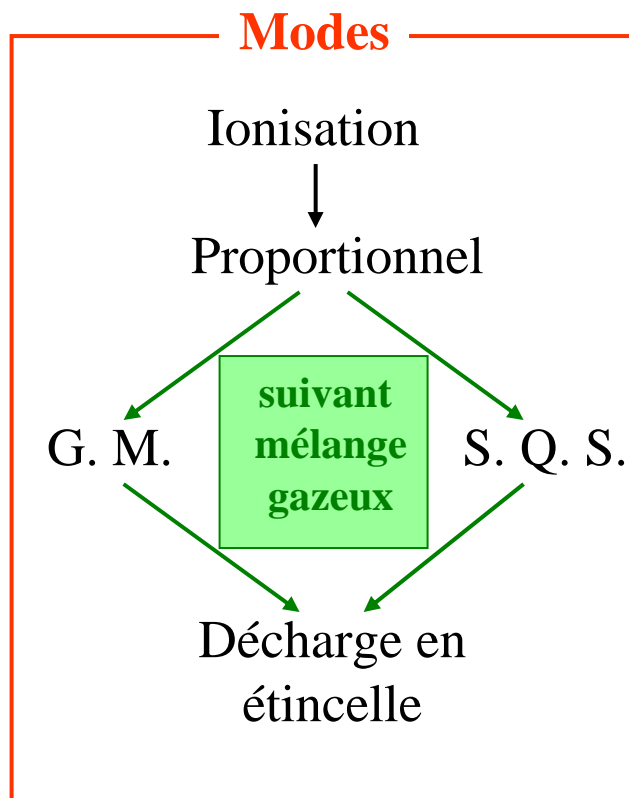
Les différents régimes de fonctionnement d'un compteur à gaz

Mode S. Q.S. (Self-Quenching Streamer)

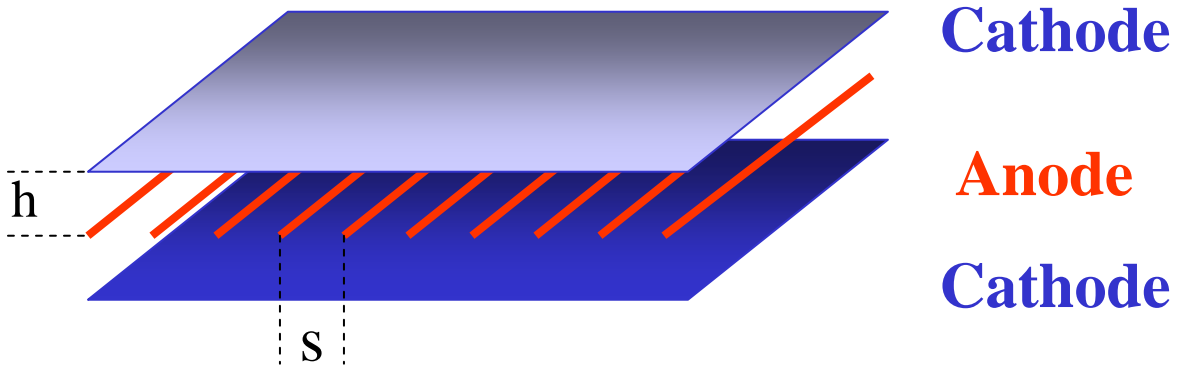
Différents modes de fonctionnement



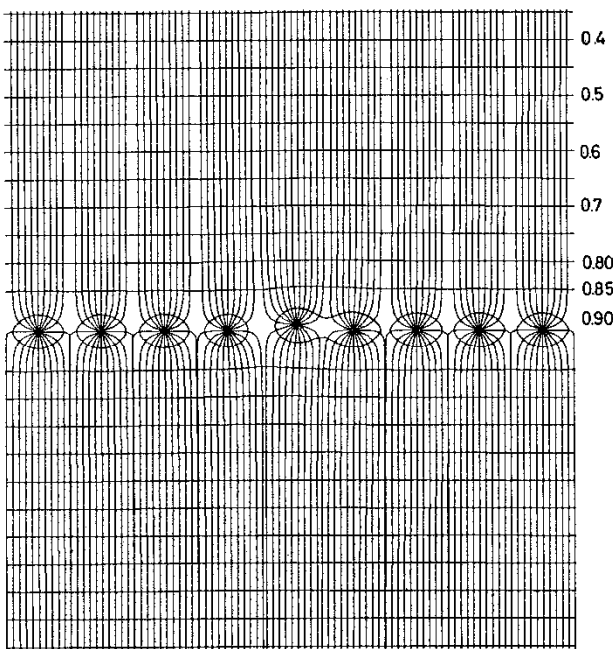
a) Compteur proportionnel ; b) Compteur Geiger ; c) Tube en mode SQS



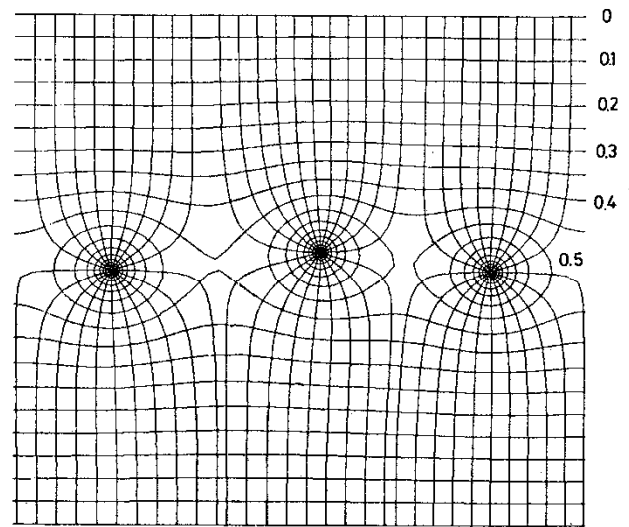
Chambre multi-fils proportionnelle (MWPC)



Au voisinage du fil
Champ électrique fort => Multiplication



(a)



(c)

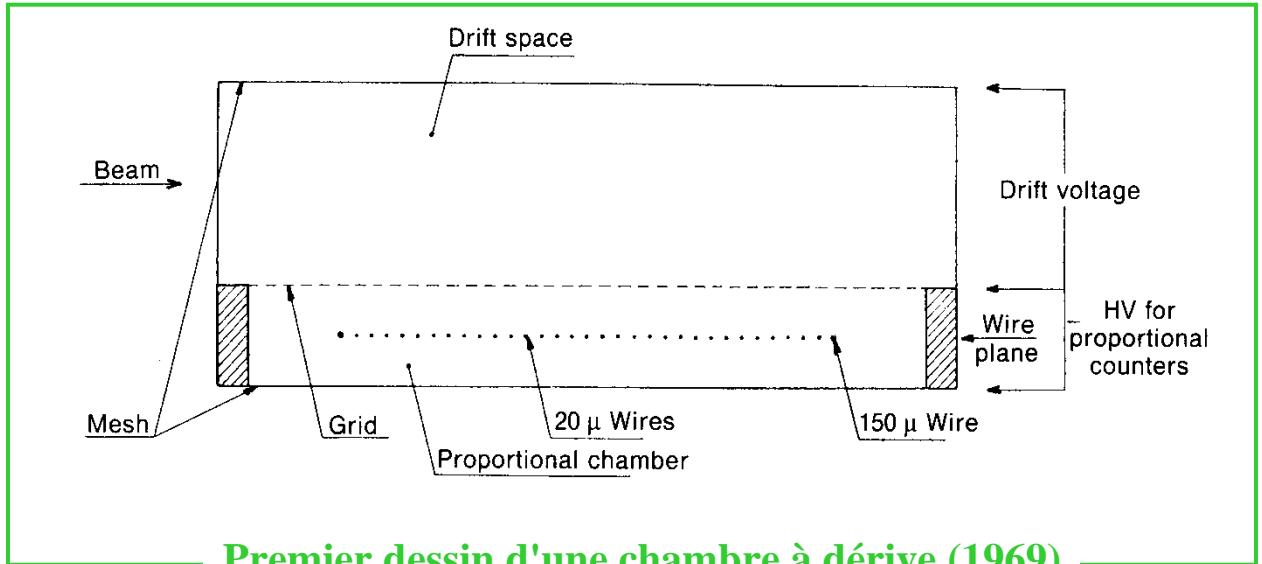
Fils de 40 μm de diamètre

$S = 1 \text{ mm}$ $h = 8 \text{ mm}$

$s = 3 \text{ mm}$ $h = 4 \text{ mm}$

Equipotentielles et lignes de champ

Drift Chamber (Chambre à dérive)



Premier dessin d'une chambre à dérive (1969)

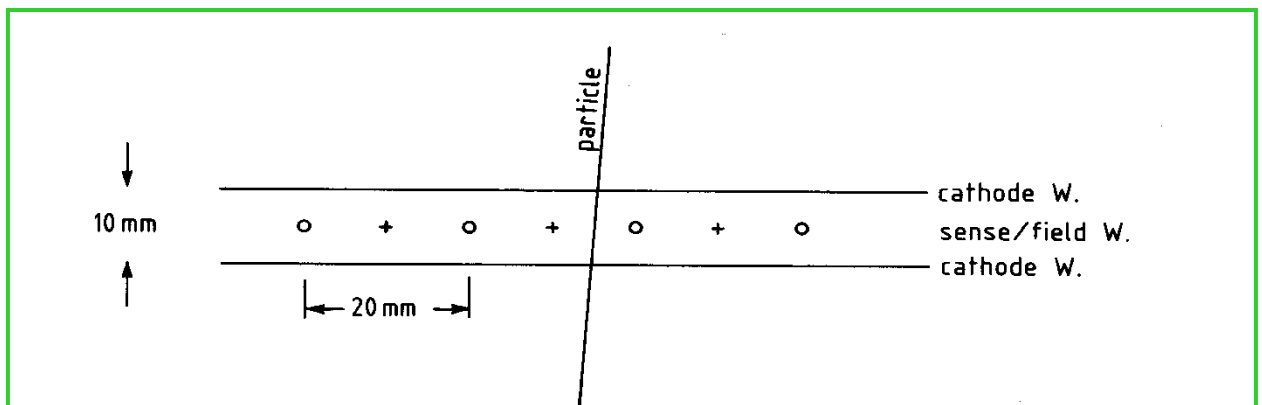


Fig. 10.2. Disposition of the electrodes in the chamber built by Walenta et al.

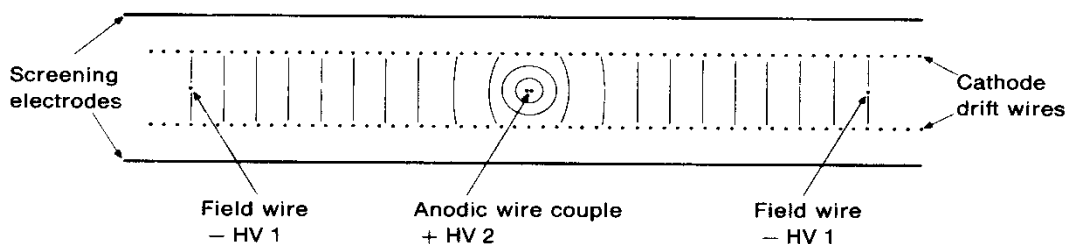
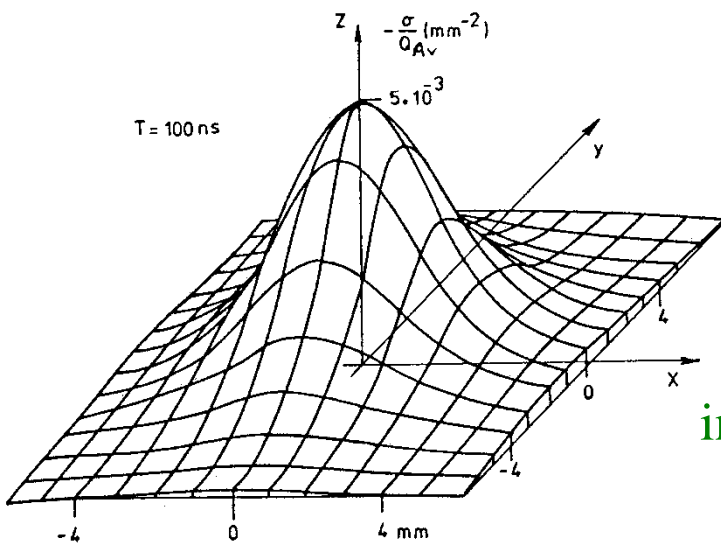
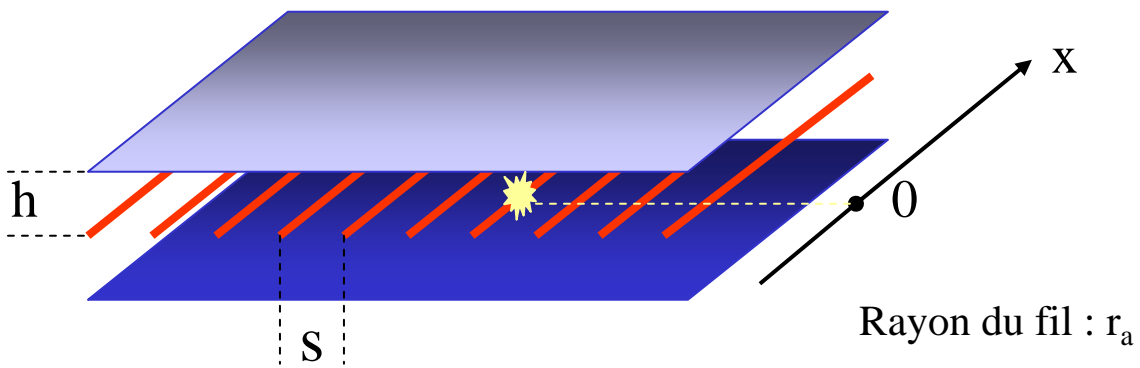


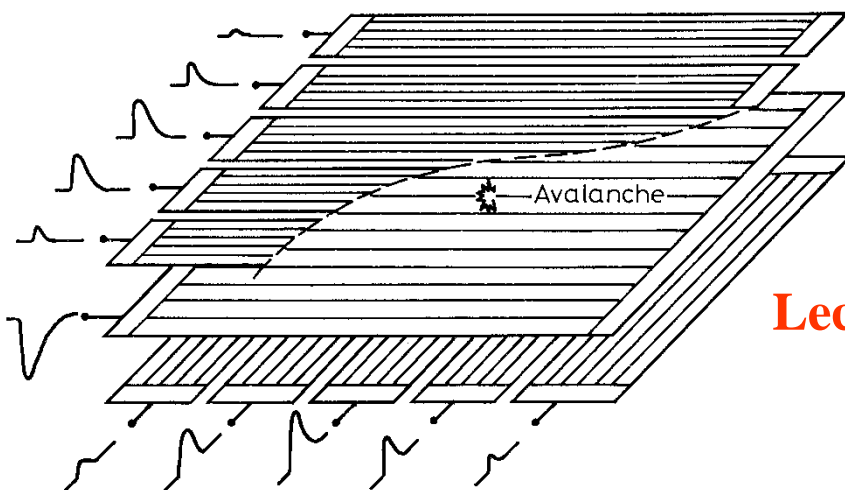
Fig. 10.3. Disposition of the electrodes in the chamber built by Breskin et al. [BKE 75], cathode wires at uniformly decreasing potentials produce a long and homogeneous drift field

Développement des chambres à dérive

C S C (Cathode Strip Chamber)



Forme de la
Distribution en charge
induite sur les plans de cathode

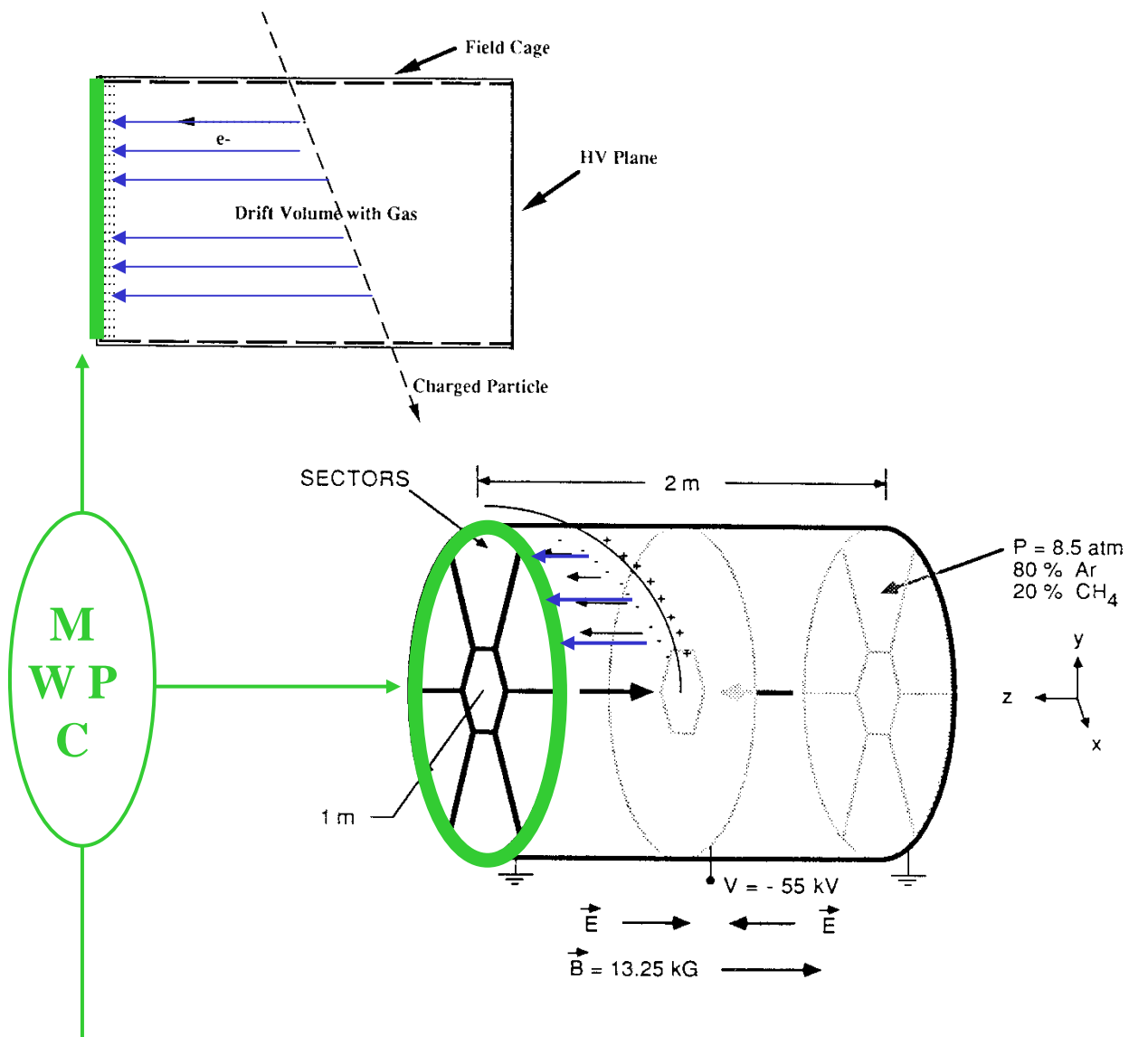


Possibilité de
Lecture bidimensionnelle

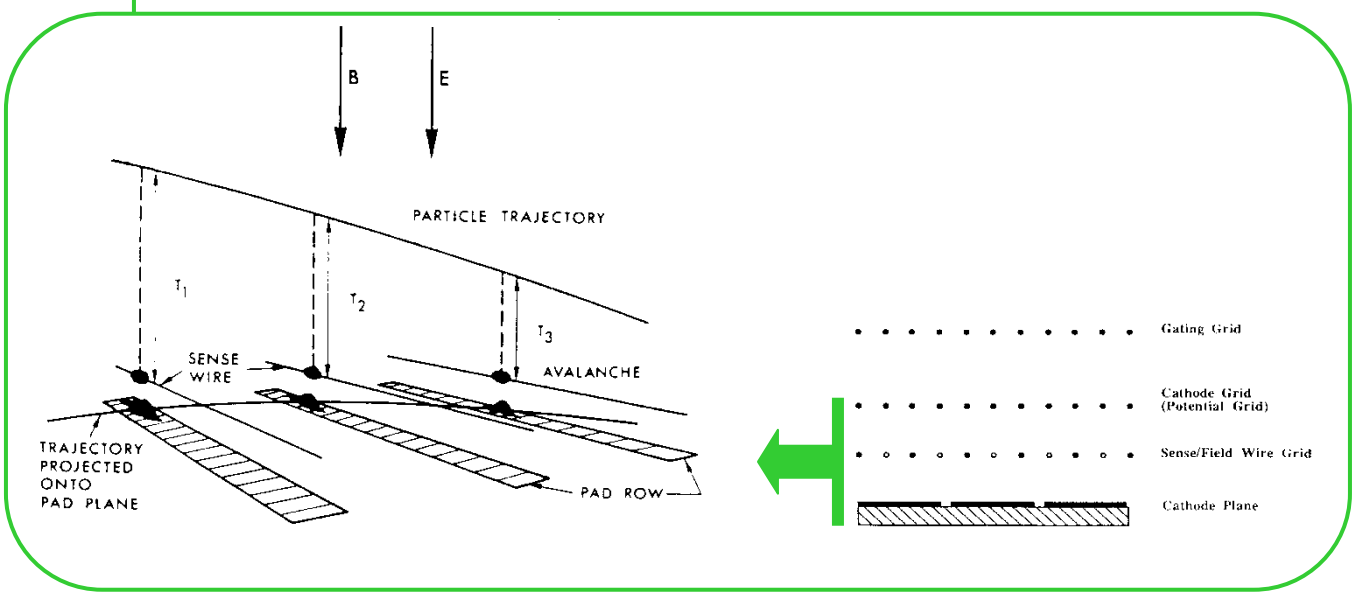
Mais...

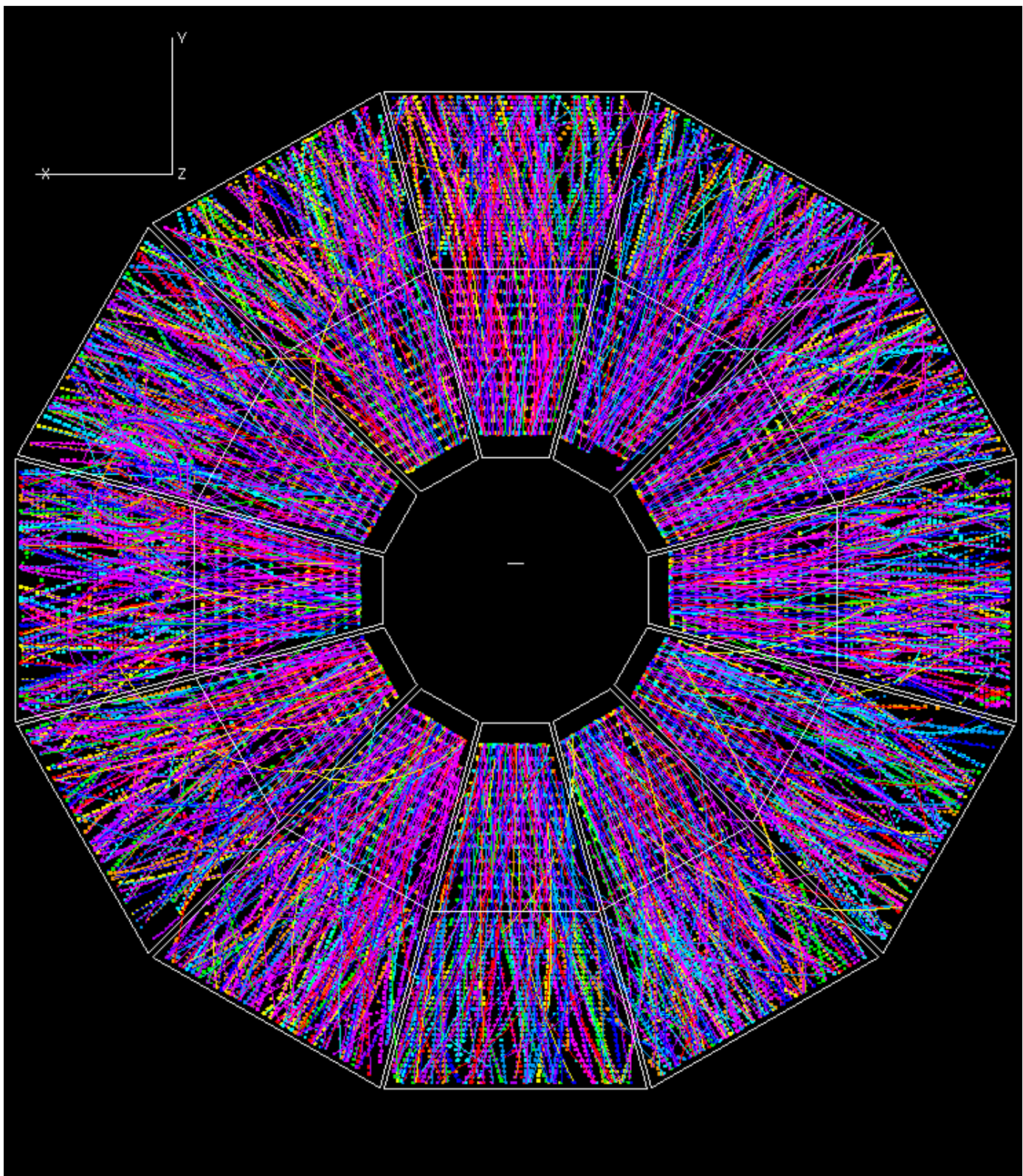
Bonne précision uniquement dans le sens du fil

T P C (Time Projection Chamber)



M
W
P
C





TPC de STAR à RHIC

Détecteurs à plaques parallèles



Multiplication du nombre d' électrons :
 $M = N / N_0 = \exp(\alpha \cdot x)$ sur une longueur x
où α est le premier coefficient de Townsend

α de la forme $\alpha / p = A \cdot \exp\{-B / (E/p)\}$
avec p pression et E/p champ électrique réduit
(A et B paramètres dépendant du gaz)

Champ fort : détecteur mince (100 μm à qqs mm)

Physique nucléaire (ions lourds)

N_0 assez grand
Basse pression

Mode proportionnel
Gains typiques :
 10^4 avec $E/p = 500 \text{ V/cm.torr}$

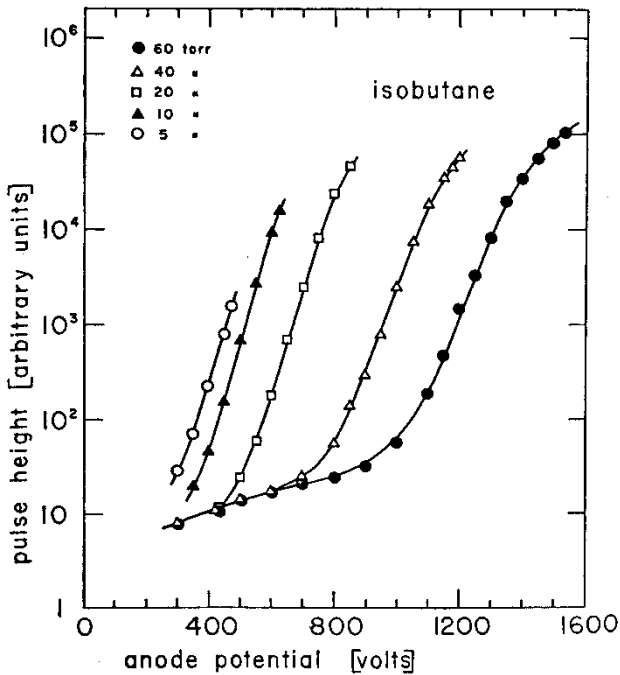
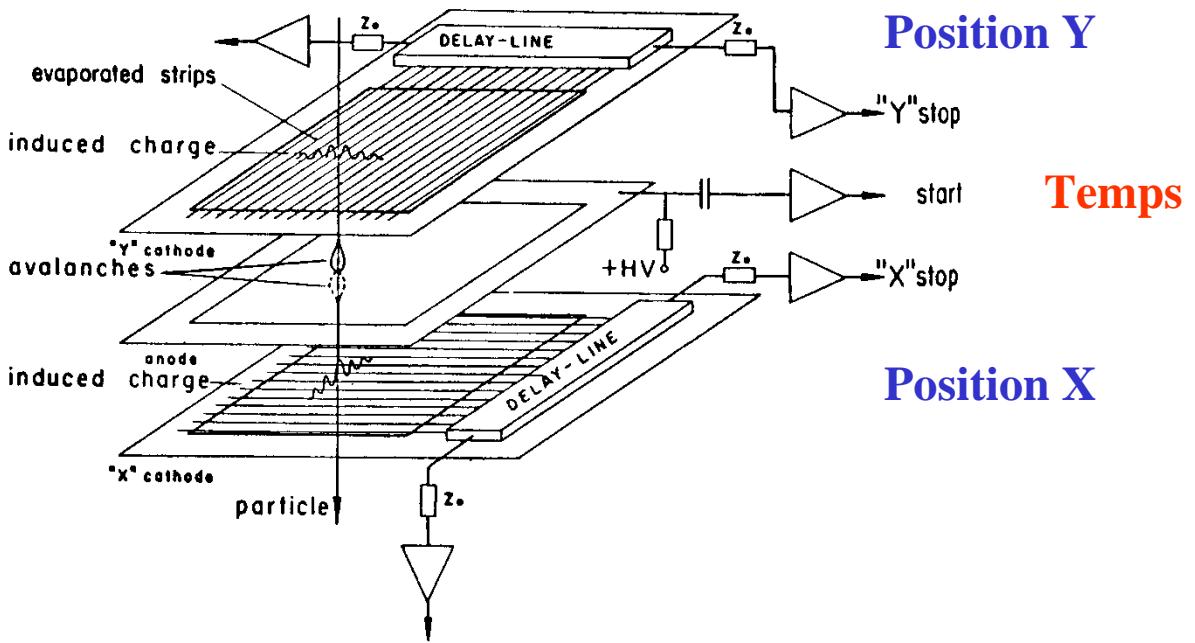
Physique particules (m. i. p.)

N_0 très petit
Pression 1 ou qqs atm.

Nécessité gain très élevé
Modes
Proportionnel ; SQS ; Décharge

PPAC à basse pression

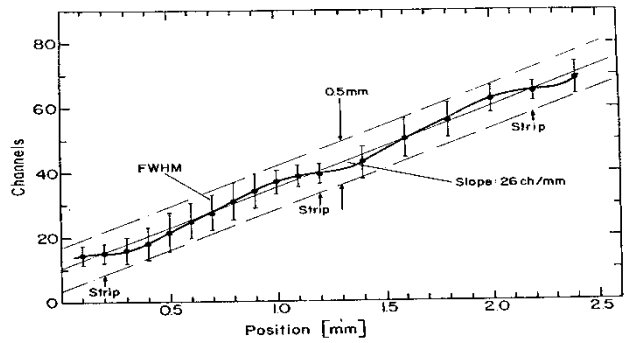
Ionisation primaire importante : Physique nucléaire (ions lourds , basse énergie)



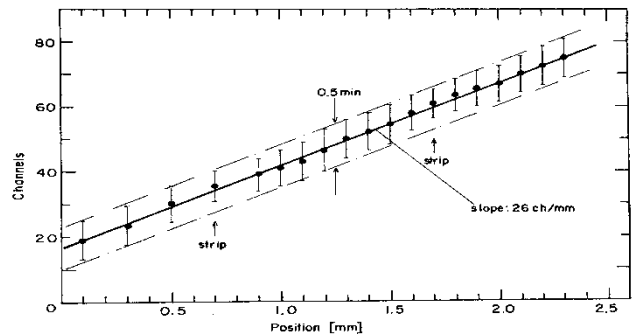
Gains relatifs

Temps

140 ps (FWHM) avec α de 5,5 MeV



Isobutane ; d = 1,6 mm ; p = 25 Torr



Isobutane ; d = 3,2 mm ; p = 25 Torr

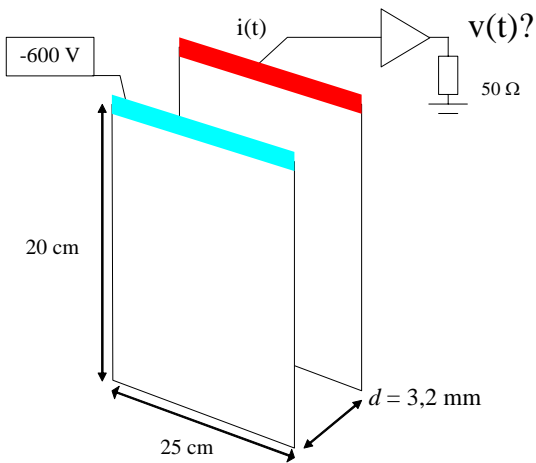
Position

Déplacement

Résolutions (FWHM)

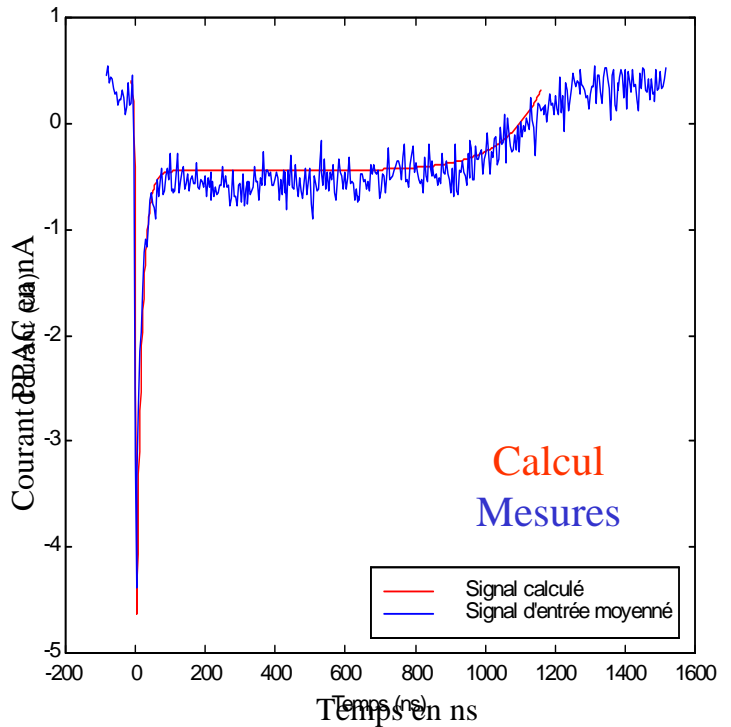
(Pistes de 0,6 mm, période: 1mm)

PPAC à basse pression. Modélisation



Surface : 20 x 25 cm²
 Gap : 3,2 mm

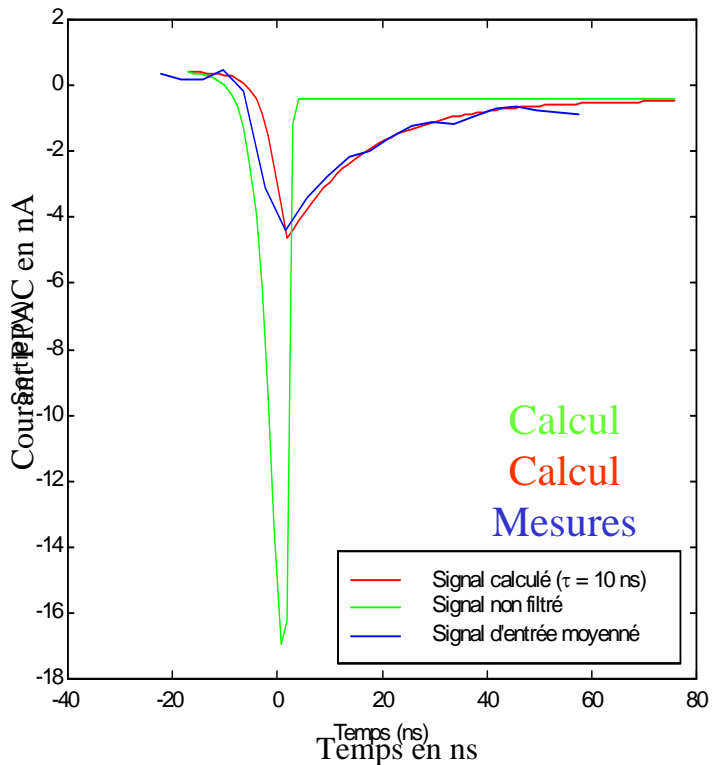
Isobutane 5 Torr
 HT = 600 V



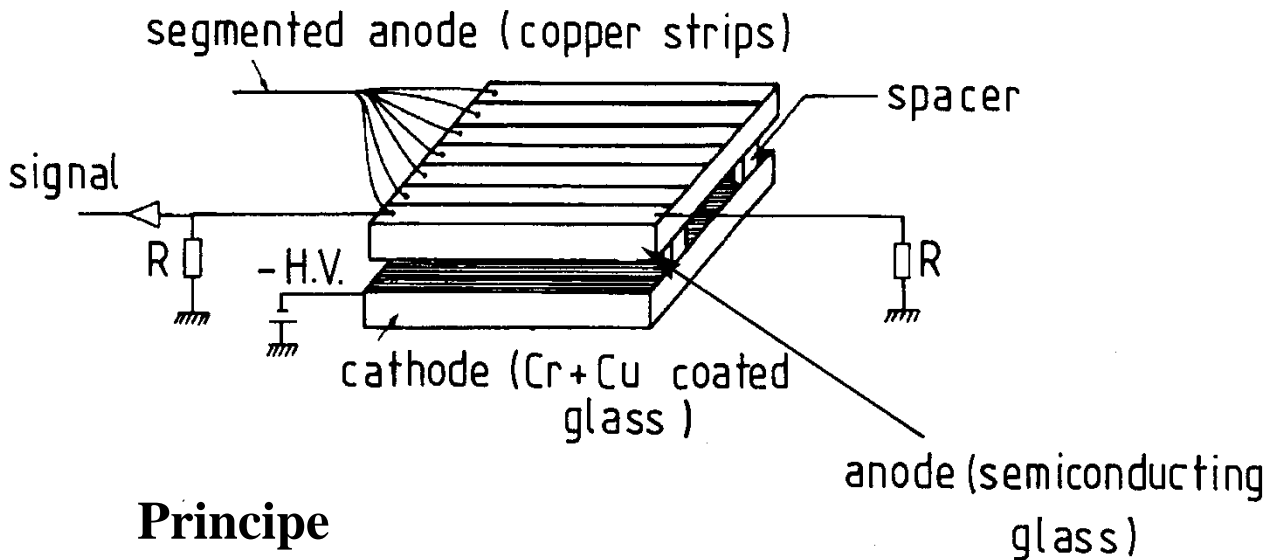
Coef. de Townsend : 41 cm⁻¹

Vitesses de dérive :
 électrons : 160 μm/ns
 ions : 2,3 μm/ns

Capacité détecteur : 140 pF
 Impédance électronique : 70 Ω



Détecteur plan à étincelles



Principe

Compteur « Pestov »

Introduit en 1971

INP Novosibirsk et développé par Pestov

Gaz : 55% argon + 30% ether + 10 % air + 5% divinyl
 $d = 100 \mu\text{m}$, $p = 1 \text{ atm.}$, Résolution : 100 ps (FWHM)

Aujourd'hui (2000)

Gap : $100 \mu\text{m}$

Pression : 12 bar

Gaz (en bar) : 9,23 Ar + 2,4 C_4H_{10} + 0,3 C_2H_4 + 0,07 C_4H_6

Bonne résolution en temps

Bonne efficacité (96 %)

Bonne absorption des photons

Résolution

Mais...

Excellente 25 à 80 ps (en FWHM/2,35)

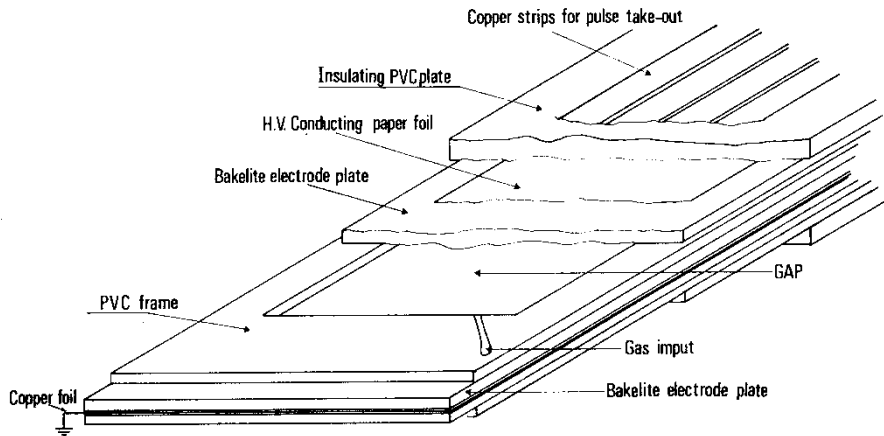
Queue de qq% > 500 ps (non gauss.)

et surtout...

Construction délicate

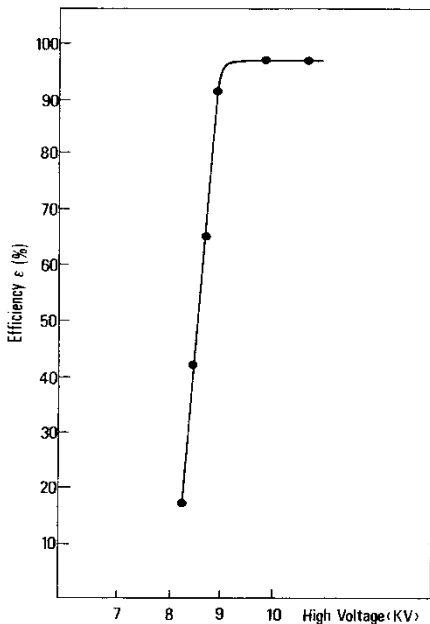
RPC : Resistive Plate Counter (ou Chamber)

Introduit en 1981 par Santonico et Cardarelli (INFN Roma)

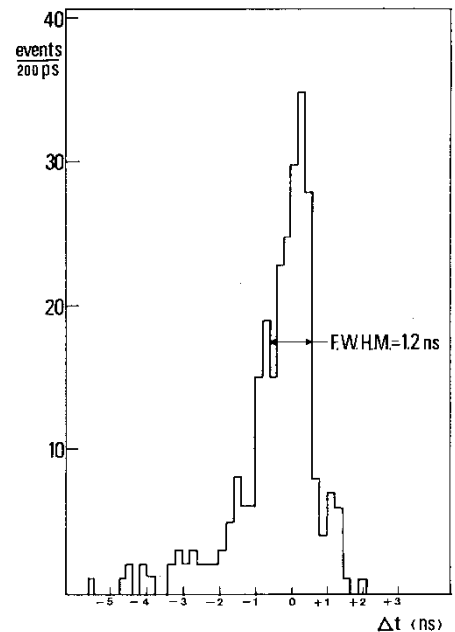


Prototype (85 x 13 cm²)

Electrodes en bakélite : résistivité de $10^{10} - 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$
Gap : 1,5 mm Gaz : argon (50 %) et butane
Pistes de 30 mm , séparées de 2 mm

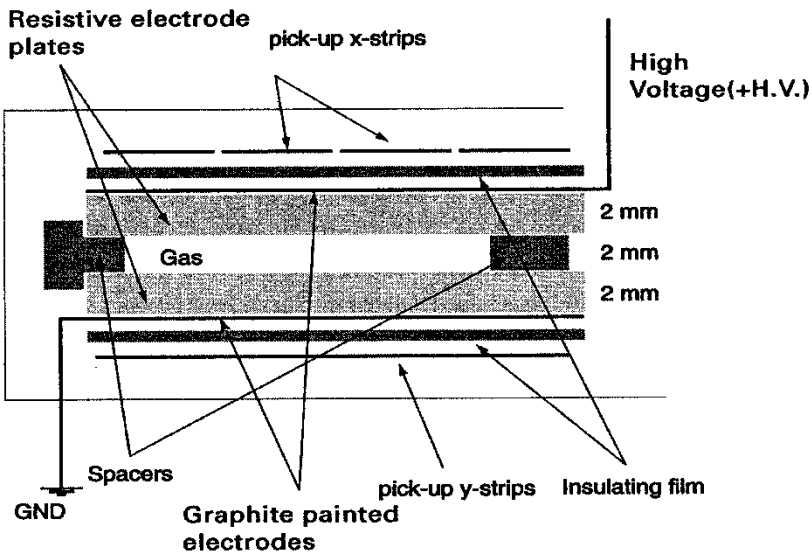


Efficacité (Seuil 30 mV) 97 %
Impulsions 200 – 400 mV



Résolution en temps

RPC – Trigger du Bras dimuons de ALICE



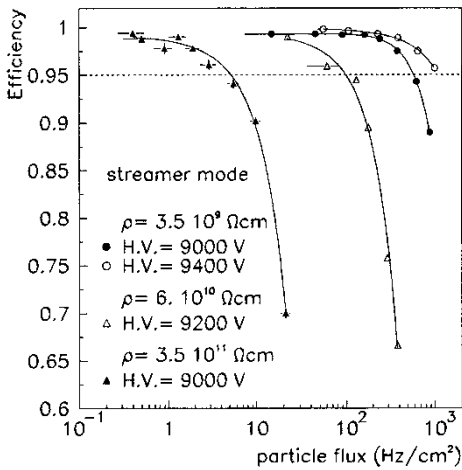
Prototype
(50 x 50 cm²)

largeur pistes : 1 ou 2 cm

Gap : 2 mm

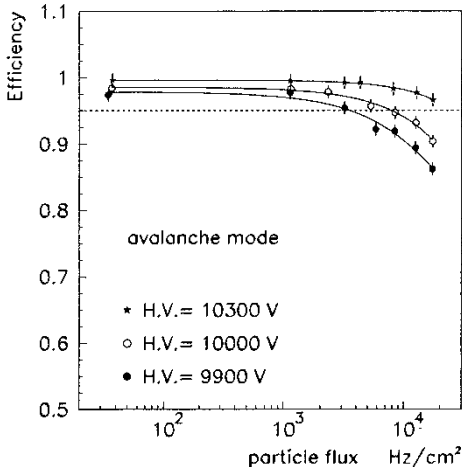
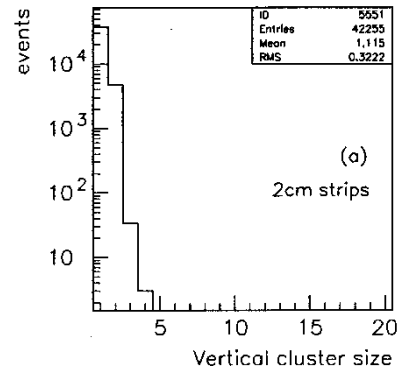
Electrodes en bakélite
(avec huile de lin)

Différentes résistivités
(Standard : $3,5 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$)



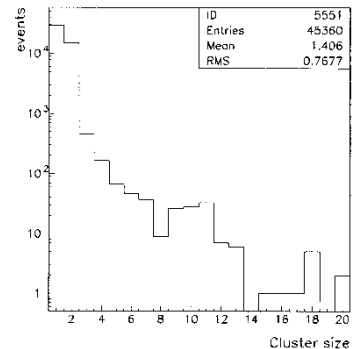
Mode « Streamer »

Ar (49%) + i-C₄H₁₀ (7%)
+ C₂H₂F₄ (40%) + SF₆ (4%)



Mode « Avalanche »

C₂H₂F₄ (95%)
+ i-C₄H₁₀ (3%) + SF₆ (2%)

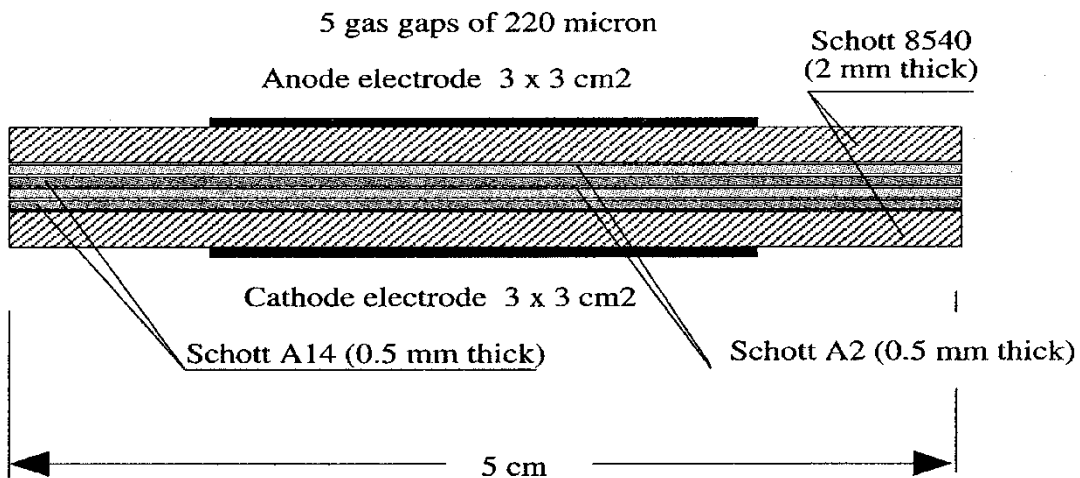


Efficacité en fonction du flux

Taille des « clusters »

RPC – Multigap (MRPC)

'Single cell' Multigap RPC



Prototype « une cellule »

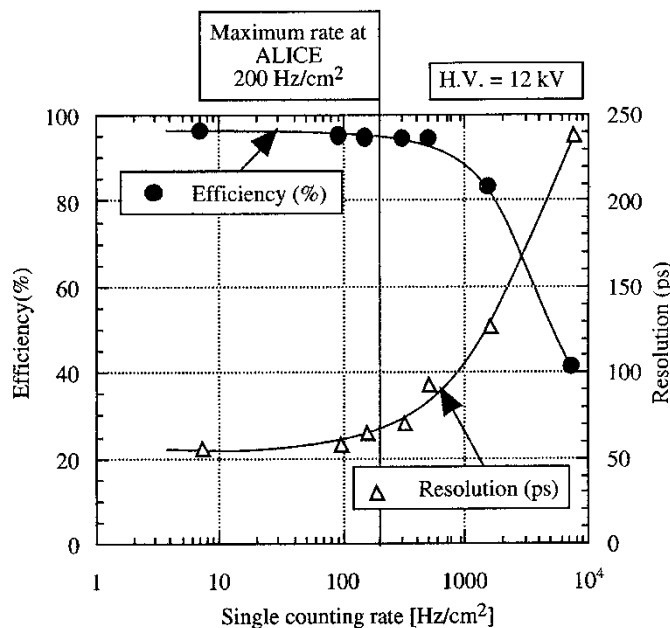
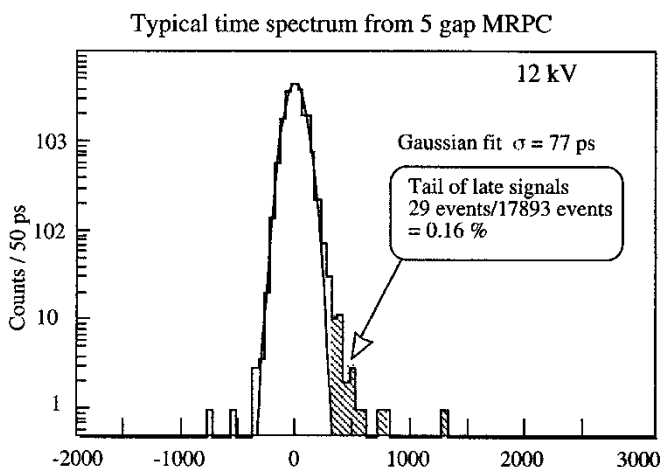
Gaz : 5% SF₆ + 5% isobutane + 90% C₂F₄ H₂

Résistivités

Schott A2 : 8 x 10¹² Ω.cm

Schott 8540 : 10¹⁰ Ω.cm

Schott A14 : 1,5 x 10¹² Ω

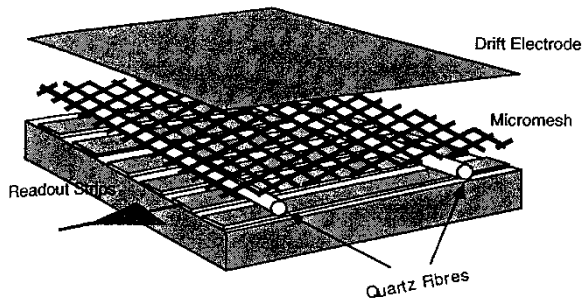


Résolution en temps

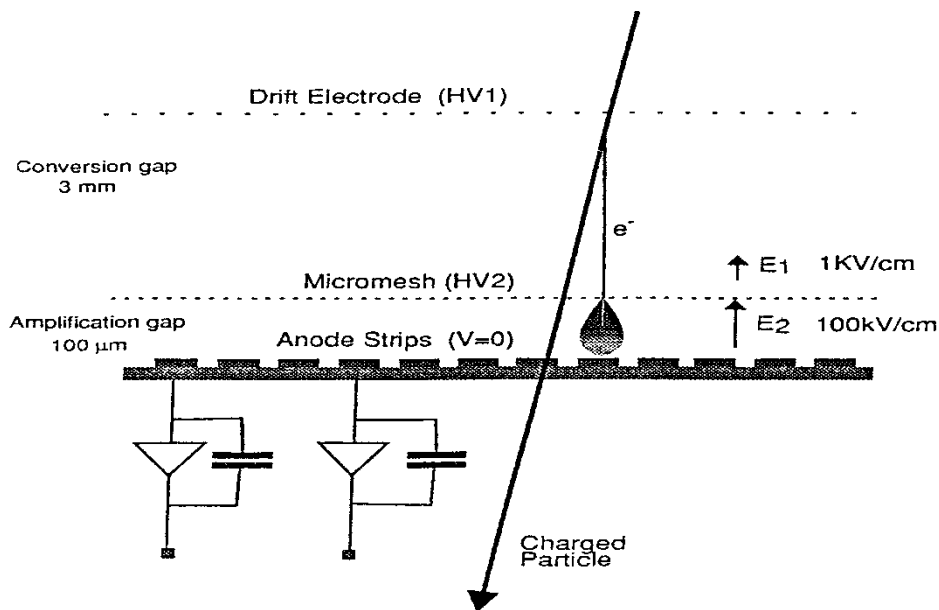
Efficacité et résolution

En fonction du taux de comptage
GIF @ CERN (Source de ¹³⁷Cs)

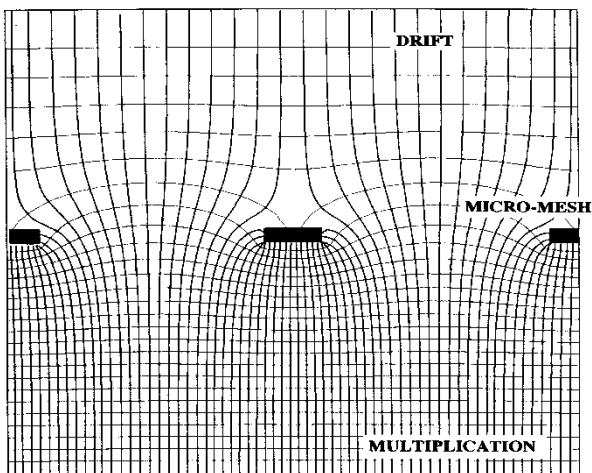
MICROME GAS (MICRO – MESH – Gaseous Structure)



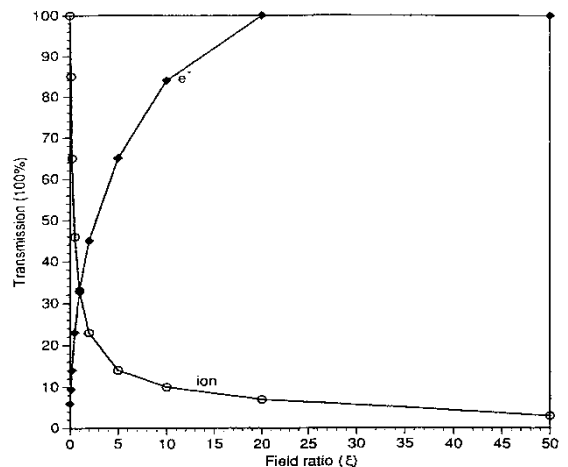
Introduit en 1996
par
Giomataris, Rebougeard
Robert et Charpak
(CEA, DAPNIA, Saclay)



Grille
Nickel
Carrés
Pas : 25 μm
Epais. : 3 μm
Transp. : 45 %



Forme du
champ électrique



Transparence de la grille (Calcul)
 $\xi = E(\text{multipl.}) / E(\text{dérive})$

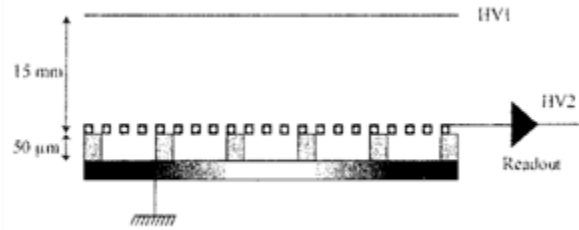
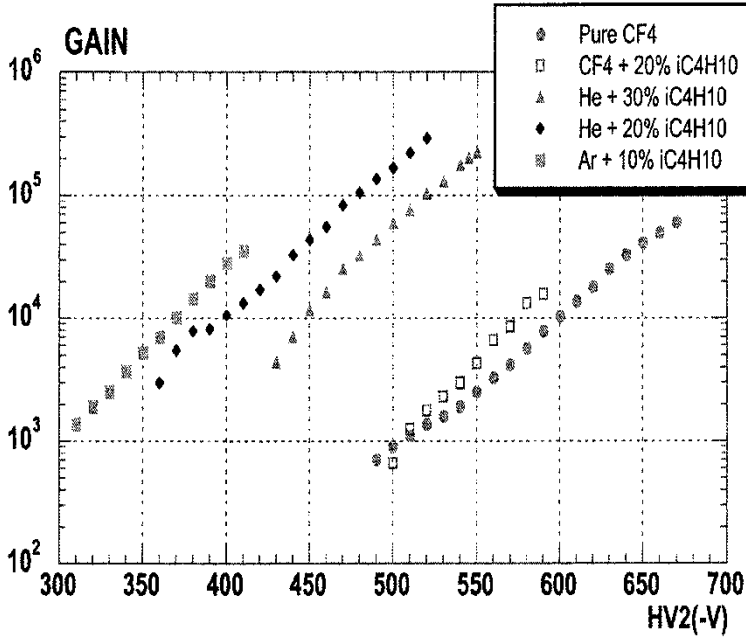
MICROME GAS

Multiplication dans un champ très fort

Saturation du Coefficient de Townsend
Faible variation du gain en fonction du gap

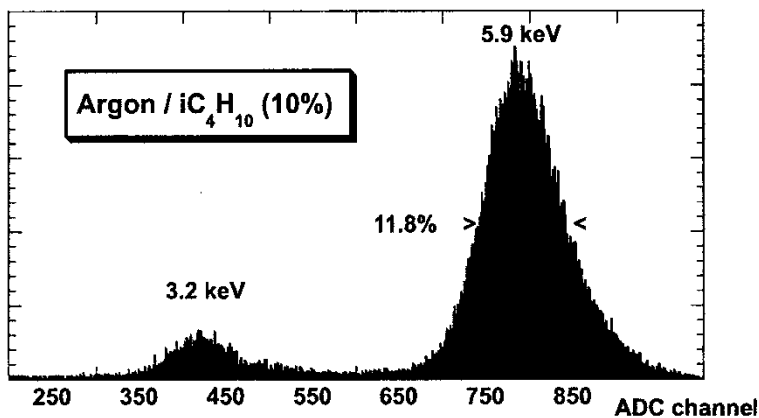
Faible gap

Signaux rapides



Grille / Supports
Cuivre 5μm / Kapton 50μm

Gain

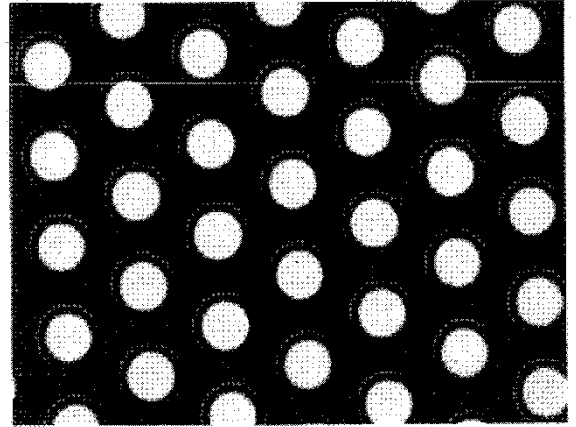
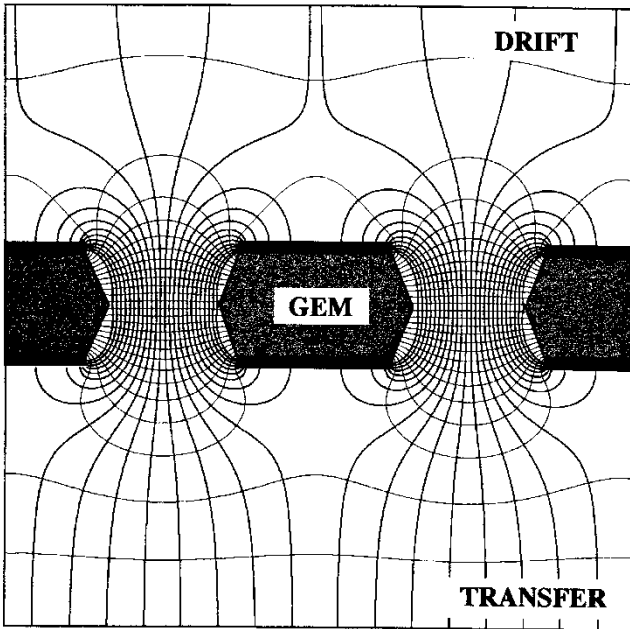


Résolution en énergie

Avec l'ancienne grille en nickel
R = 14%

GEM (Gas Electron Multiplier)

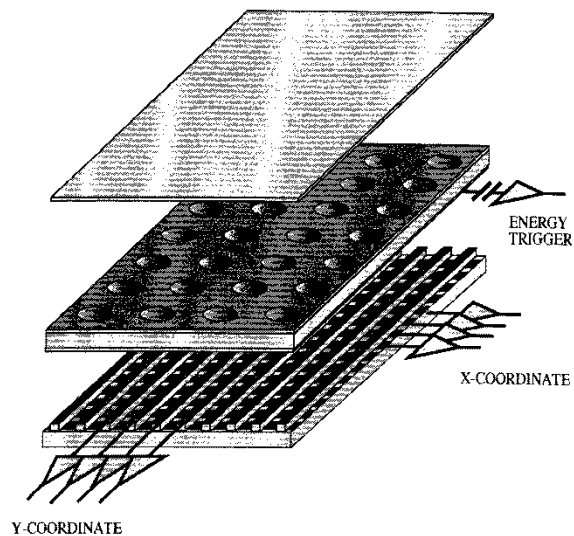
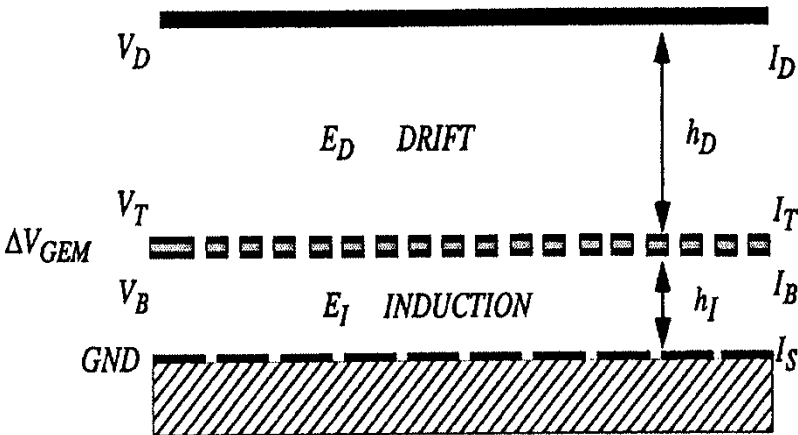
Introduit en 1996 par Sauli (CERN)



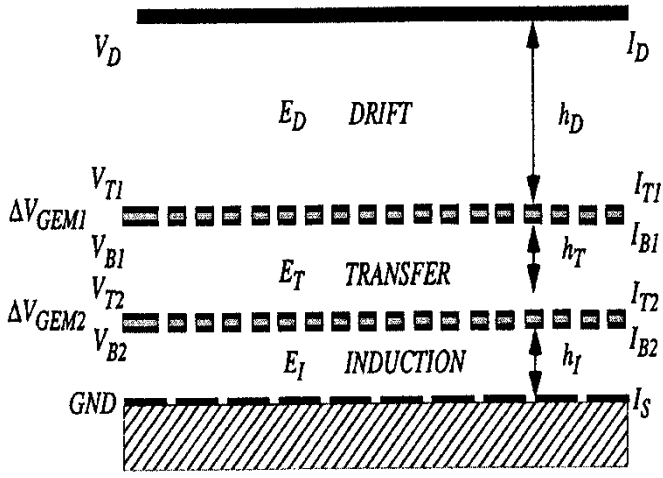
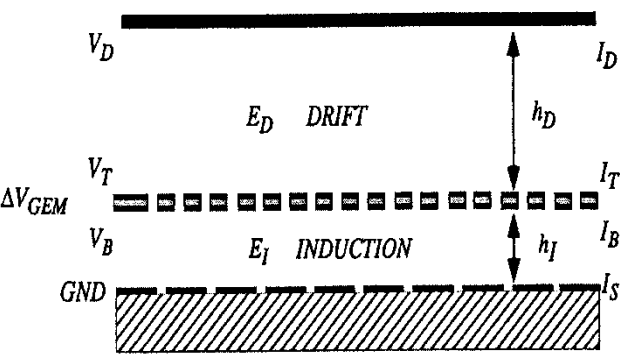
GEM
Fabrication CERN

Kapton 50 μm
(Cuivre 5 μm)

Trous : 40 à 140 μm
Pas : 90 à 200 μm
(Standard : 70/140 μm)

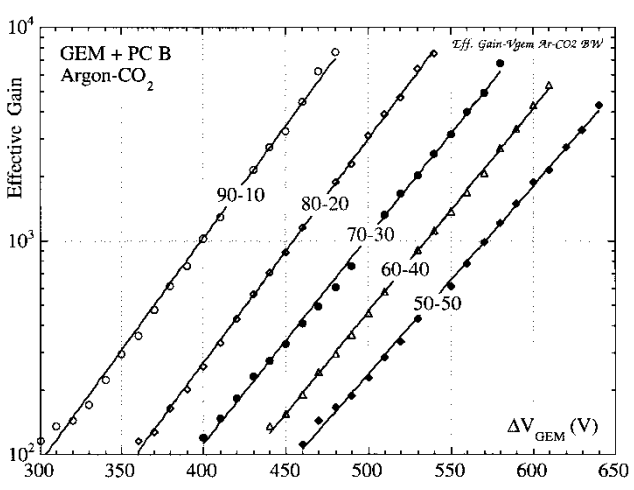


GEM Gains

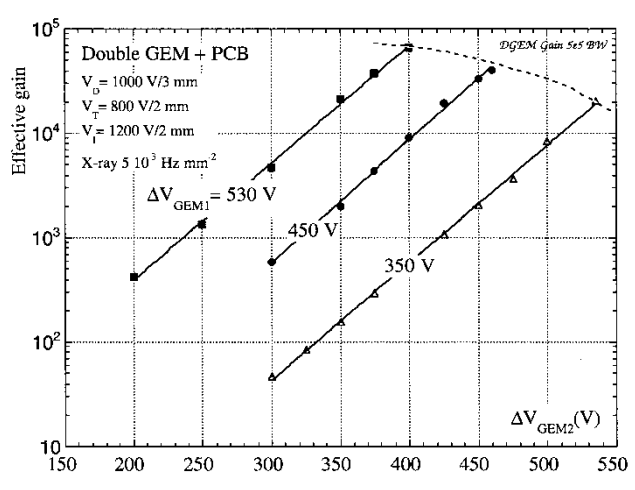


Simple GEM

Double GEM

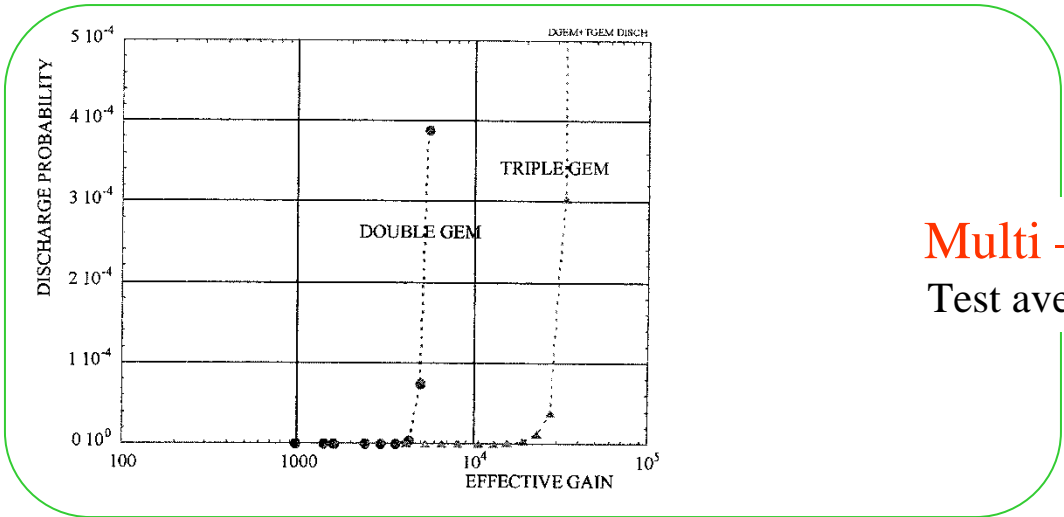
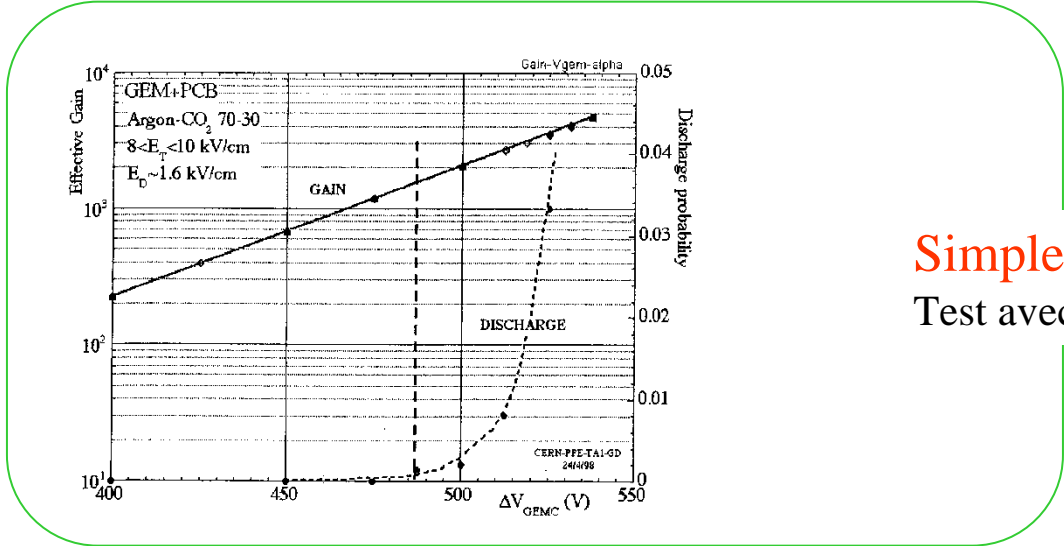


Gaz : x % Ar + y % CO₂



Gaz standard : 70% Ar + 30% CO₂

GEM Décharges



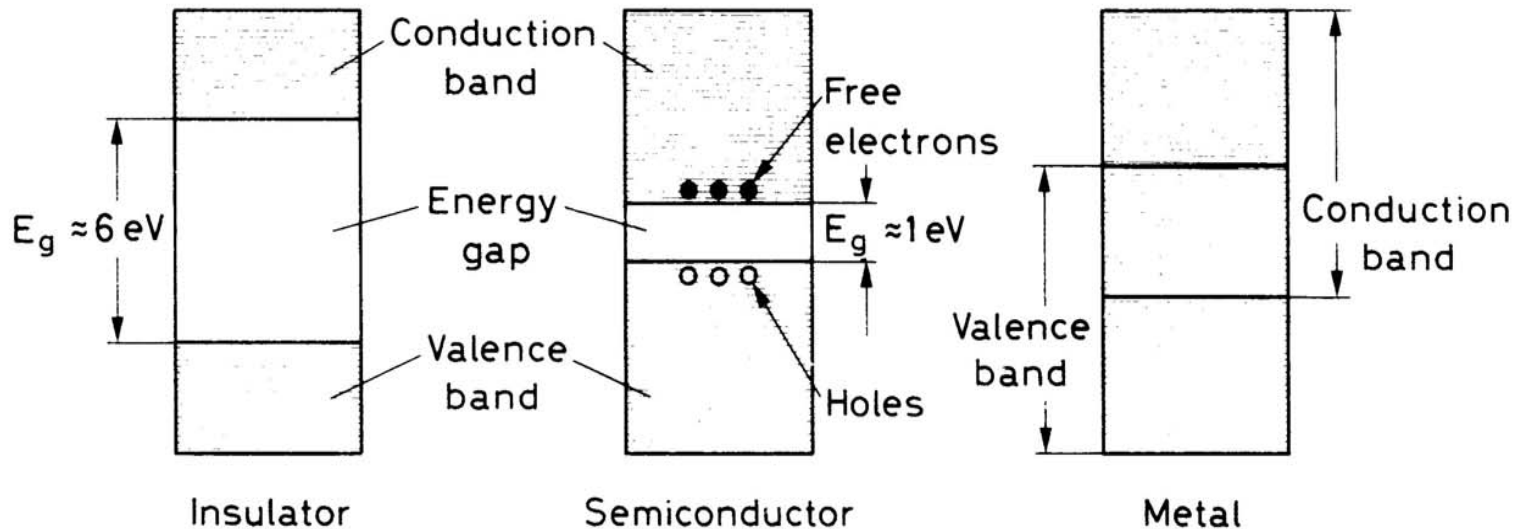
Détecteurs Semi-conducteurs

Beaucoup d'extraits de l'ancien cours de DEA CPM
de **Sylvie Dagoret-Campagne** (LPNHE maintenant au LAL)

Bandes en énergie dans un solide

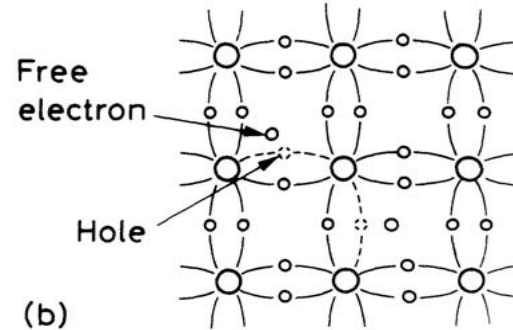
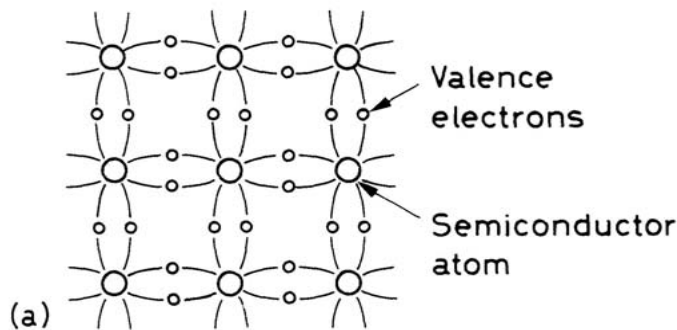
Les électrons se répartissent dans des bandes en énergie selon la Loi de Fermi

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\epsilon - \mu(T)}{kT}\right) + 1}$$



Liaisons électroniques dans un semi-conducteur

- Atomes tétravalents: le Germanium et le Silicium



10^{22} at/cm³

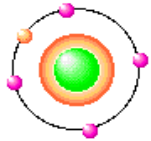
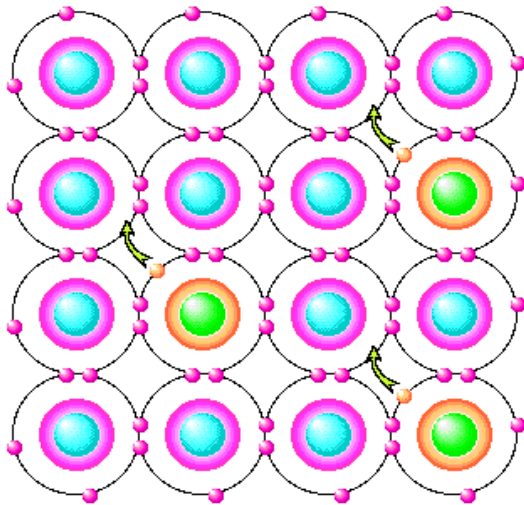
- A température non nulle, formation de paires électron/trou par excitation thermique

$$\begin{cases} n &= N_c \exp \frac{\epsilon_F - \epsilon_c}{kT} \\ p &= N_v \exp \frac{\epsilon_v - \epsilon_F}{kT} \end{cases} \quad n_i^2 \equiv np = N_c N_v \exp \frac{-E_g}{kT}$$

$n_i = 10^{11}/\text{cm}^3$ à 300 K

Dopage d'un semi-conducteur

*Semi conducteur
de type N*

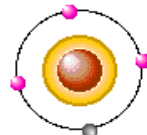
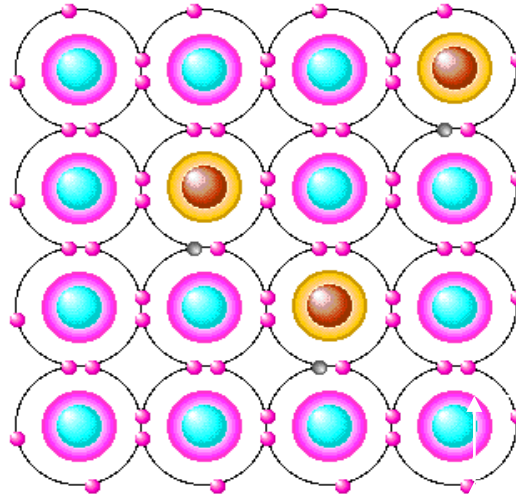


Atome donneur
(phosphore, arsenic, antimoine...)



électron libre

*Semi conducteur
de type P*



Atome accepteur
(Bore, indium, gallium, aluminium...)



Trou

Dopage

10^{13} a 10^{16}

pour

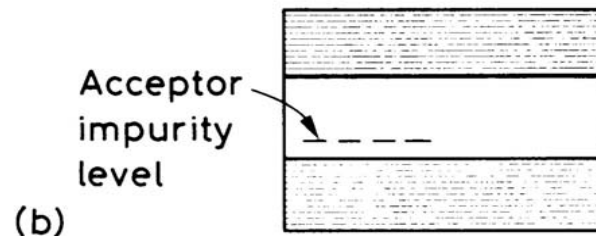
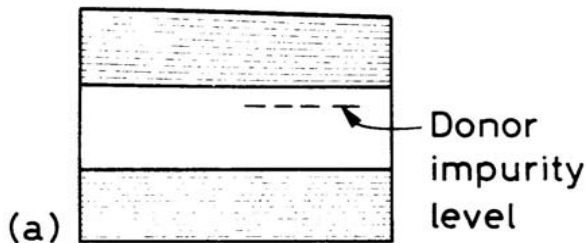
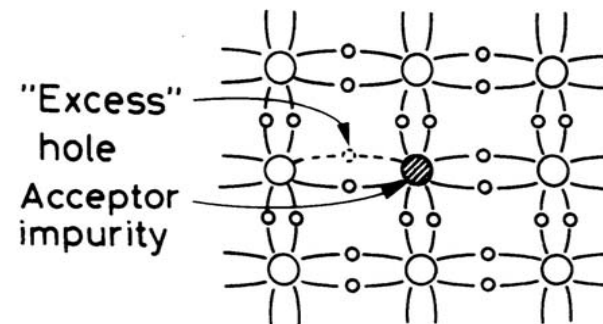
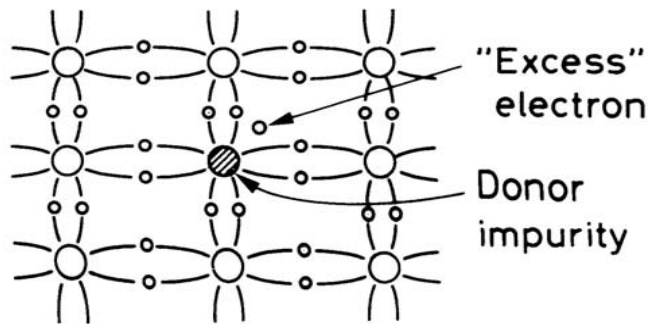
10^{22} at / cm^3

	Ge	Si	unit
Z	32	14	
A	72.6	28.1	
Dens	5,32	2,33	g/cm ²
E_g	0.7	1.1	eV
$E_{e/t}$	2.96	3,62	eV
	@77	@300	°K

Niveaux d'énergie dans un semi-conducteur dopé

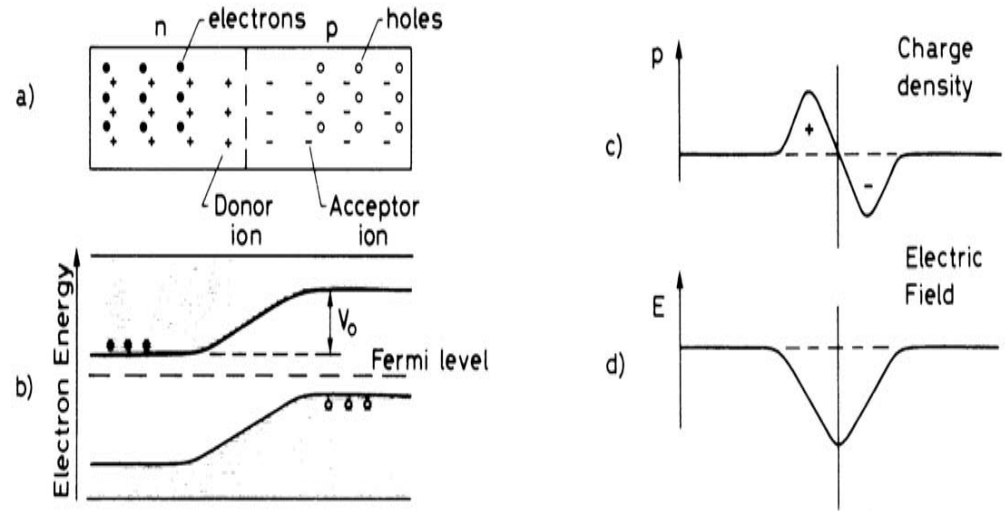
Les atomes donneurs créent un niveau dans le Gap légèrement sous le bas de la bande de conduction : résultat l'électron du donneur est excité dans la bande de conduction

Les atomes accepteurs créent un niveau (vide) dans le Gap légèrement au dessus de la bande de valence. Un électron de la bande de valence va peupler ce niveau en laissant un trou dans la bande de valence.



La jonction PN

- Diffusion des porteurs majoritaires dans la zone opposée
- Création d'une charge d'espace
- Création d'un courant de conduction



En résolvant l'équation de Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{\rho(x)}{\epsilon} = 0$$

$$\begin{cases} V_N = -\frac{eN_D}{2\epsilon}(x - x_N)^2 + V_d \\ V_P = \frac{eN_A}{2\epsilon}(x - x_P)^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_N = \frac{2\epsilon V_d}{eN_D(1 + N_D/N_A)} \\ x_P = \frac{2\epsilon}{eN_A(1 + N_A/N_D)} \end{cases}$$

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon V_T}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

Jonction PN polarisée en mode inverse

Objectif : obtenir une large zone de déplétion

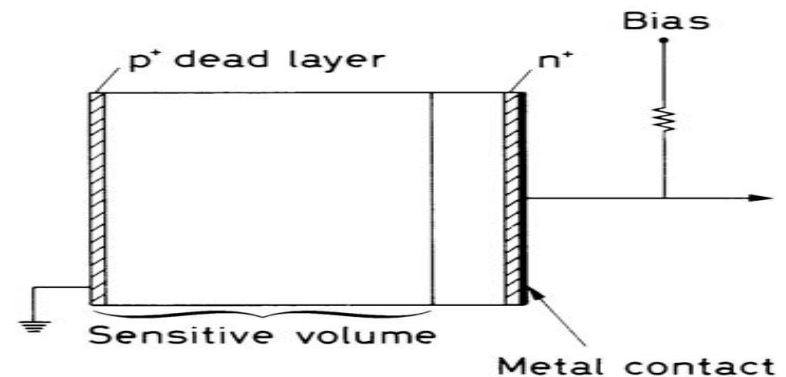
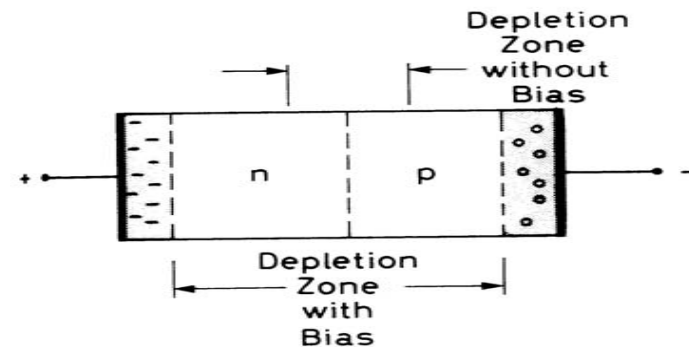
V_T est remplacé par $V_T + V_d$
d augmente

Ex. $V=300V$, $d=1mm$

Jonction PN+: objectif
Obtenir une zone de déplétion
de qq's centaines de microns

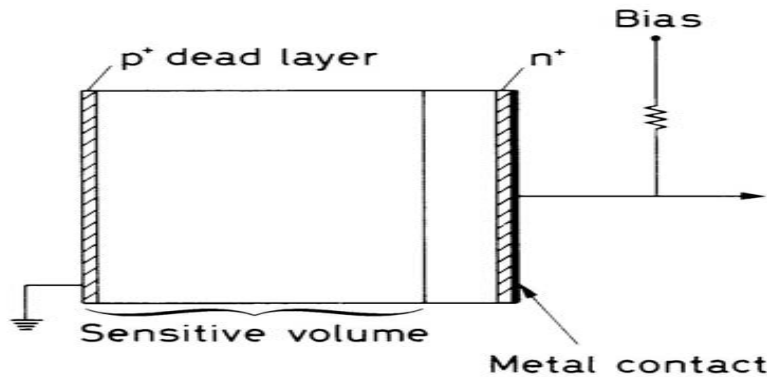
$$d = -x_P = \sqrt{\frac{2\epsilon V_d}{eN_A}} = \sqrt{2\epsilon\rho_P\mu_t V_d}$$

$$\begin{cases} d(\mu m) = 0,32\sqrt{\rho_P V_T}; (Si) \\ d(\mu m) = 0,65\sqrt{\rho_P V_T}; (Ge) \end{cases}$$



Détecteur semi conducteur

Jonction PN polarisée en inverse



1. Ionisation

électrons / trous

Création de paires ~~électrons / ions~~

2. Mouvement des électrons et des ions

Déplacement dans le champ électrique

~~3. Multiplication~~

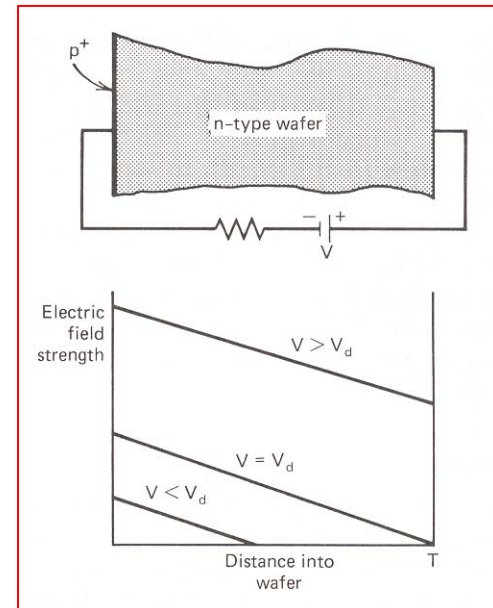
(Multiplication dans les photodétecteurs APD et SiPM)

4. Influence sur les électrodes

Création du signal

5. Electronique de lecture

Traitement du signal

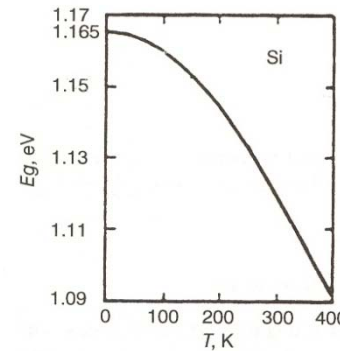
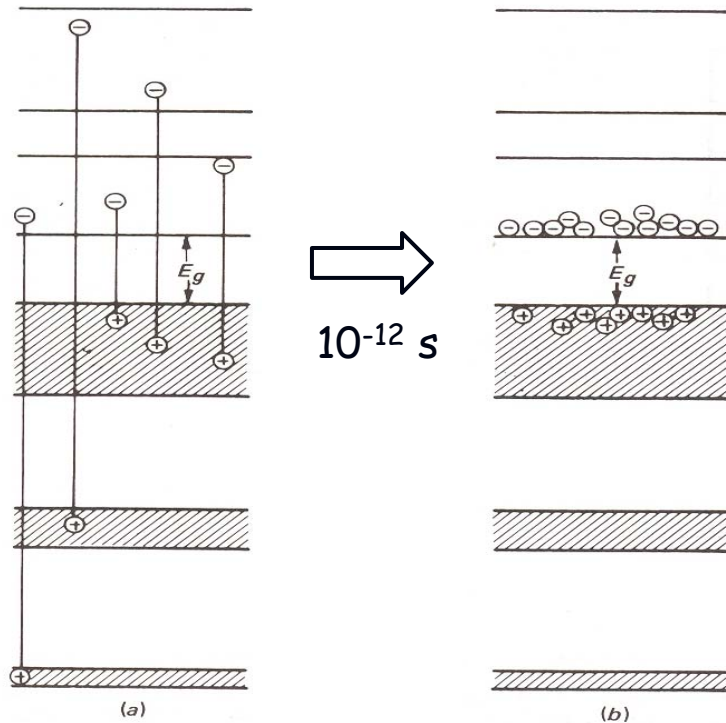


Principales caractéristiques (1)

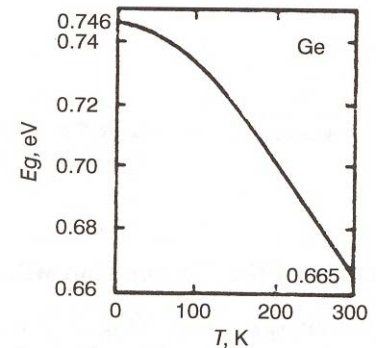
« Energy Gap »

(séparation bande de valence et conduction)

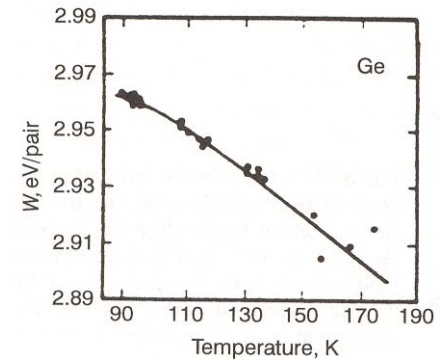
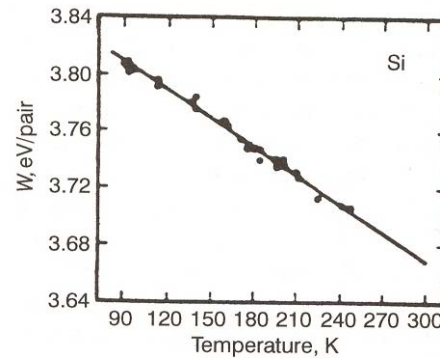
« Energy to produce a pair e/h »



Silicium



Germanium



Principales caractéristiques (2)

du Silicium et Germanium intrinsèque

TABLE 11-1 Properties of Intrinsic Silicon and Germanium

	Si	Ge
Atomic number	14	32
Atomic weight	28.09	72.60
Stable isotope mass numbers	28-29-30	70-72-73-74-76
Density (300 K); g/cm ³	2.33	5.32
Atoms/cm ³	4.96×10^{22}	4.41×10^{22}
Dielectric constant	12	16
Forbidden energy gap (300 K); eV	1.115	0.665
Forbidden energy gap (0 K); eV	1.165	0.746
Intrinsic carrier density (300 K); cm ⁻³	1.5×10^{10}	2.4×10^{13}
Intrinsic resistivity (300 K); $\Omega \cdot \text{cm}$	2.3×10^5	47
Electron mobility (300 K); cm ² /V · s	1350	3900
Hole mobility (300 K); cm ² /V · s	480	1900
Electron mobility (77 K); cm ² /V · s	2.1×10^4	3.6×10^4
Hole mobility (77 K); cm ² /V · s	1.1×10^4	4.2×10^4
Energy per electron-hole pair (300 K); eV	3.62	
Energy per electron-hole pair (77 K); eV	3.76	2.96
Fano factor (77 K)	0.143 (Ref. 7)	0.129 (Ref. 9)
	0.084 (Ref. 8)	0.08 (Ref. 10)
	0.085	< 0.11 (Ref. 11)
	to	0.057
	0.137	0.064
	0.16 (Ref. 13)	0.058 (Ref. 14)

Source: G. Bertolini and A. Coche (eds.), *Semiconductor Detectors*, Elsevier-North Holland, Amsterdam, 1968, except where noted.

Principales caractéristiques (2)

Forme du signal

- Déplacement des charges dans le champ

$$V = \mu.E \quad (\text{électrons et trous})$$

Remarque : si la densité d'ionisation est élevée,
considérer «l'effet plasma»

- Influence sur les électrodes

Appliquer le Théorème de Ramo

Principales caractéristiques (3)

Résolution en énergie

Facteur de Fano

Since each ionization leads to a charge pair that contributes to the signal

$$N_i = N_Q = \frac{E_0}{\epsilon_i}$$

where ϵ_i is the average energy loss required to produce a charge pair,

$$\sigma_Q = \sqrt{F N_Q}$$

the Fano factor F .

In Silicon
 $E_x = 0.037$ eV
 $E_i = E_g = 1.1$ eV
 $\epsilon_i = 3.6$ eV

for which the above expression yields $F = 0.08$, in reasonable agreement with the measured value $F = 0.1$.

⇒ The variance of the signal charge is smaller than naively expected

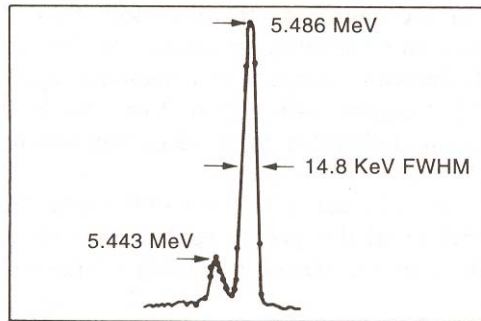
$$\sigma_Q \approx 0.3 \sqrt{N_Q}$$

Mais...

Principales caractéristiques (3)

Résolution en énergie

- 1- Ne s'applique pas aux détecteurs en transmission
- 2- Considérer aussi d'autres facteurs



²⁴¹Am et Détecteur BS

Nombre de paires:

$$5.48 \times 10^6 / 3.6 = 1,5 \times 10^6$$

Résolution relative: 0,024 %

Soit 1,33 keV ... en σ !

ou 4,4 keV en fwhm ($2.35.\sigma$)

Autres sources de "Bruit"

- Collection de charge incomplète
- Courant de polarisation du détecteur (important pour les BS)
- Electronique (peut devenir important à très basse énergie)

Et aussi :

Effet de taille du détecteur et de densité d'énergie (ions lourds)

Utilisation en physique de hautes énergies

Mesure de la position

Détecteurs de « Vertex » ou de « Traces »

Silicium de 300 μm

Particule au Minimum d'ionisation (mip) :

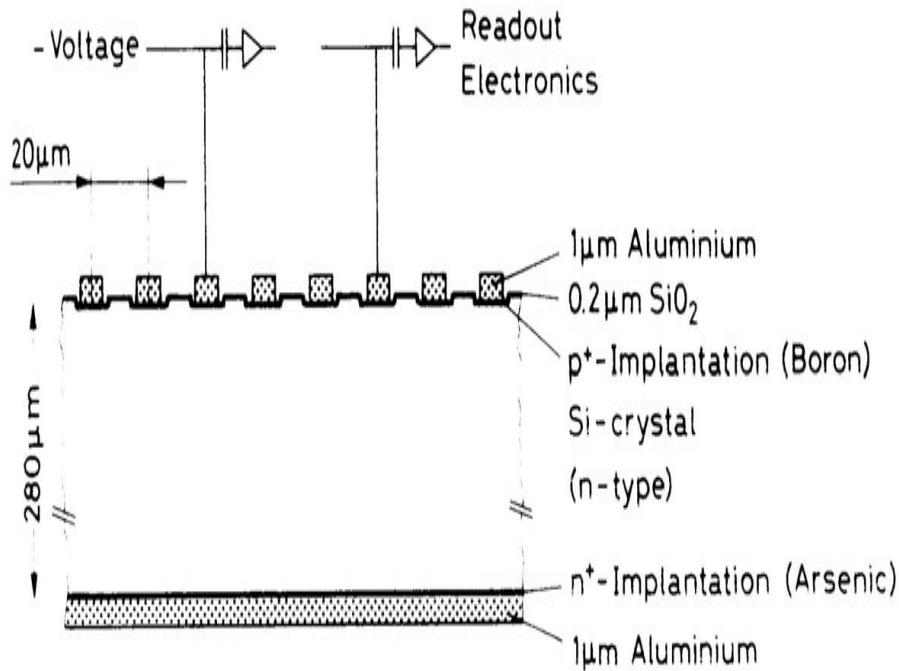
Dans une zone déplétée de 300 μm , un mip dépose une énergie :
$$E = 0.03\text{cm} \times (1.6 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)) \times (2.33\text{g}/\text{cm}^3) = 100 \text{ KeV}$$

Sachant qu'il faut 3.6 eV pour libérer une paire électron-trou dans le silicium, le nombre de paires créées est de :

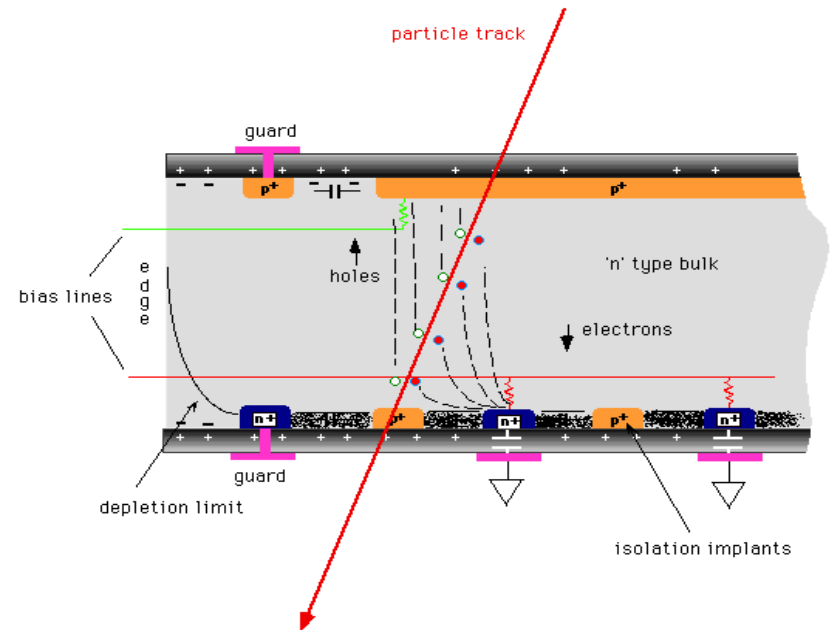
$$100 \text{ KeV} / 3.6 \text{ eV} = 25000 \text{ paires.}$$

(80 paires par micron pour un mip)

Les détecteurs microstrips



Détecteur de Vertex Atlas



Détecteur au Silicium dans Atlas



STC d'ATLAS

Plaquette 6cm x 6 cm

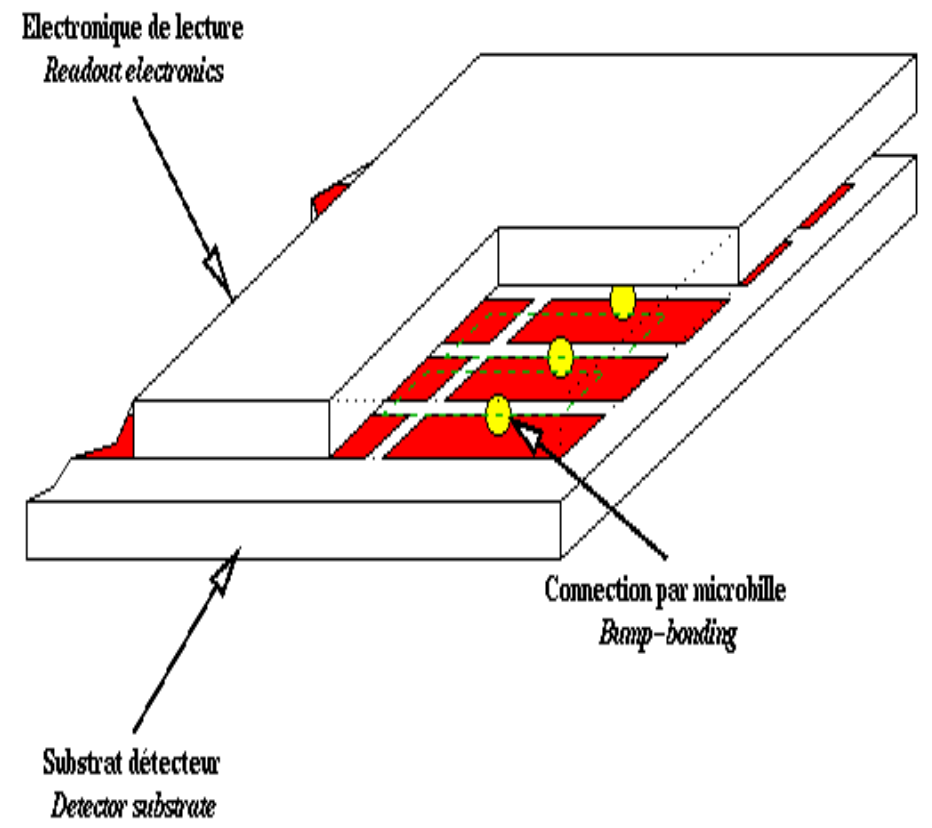
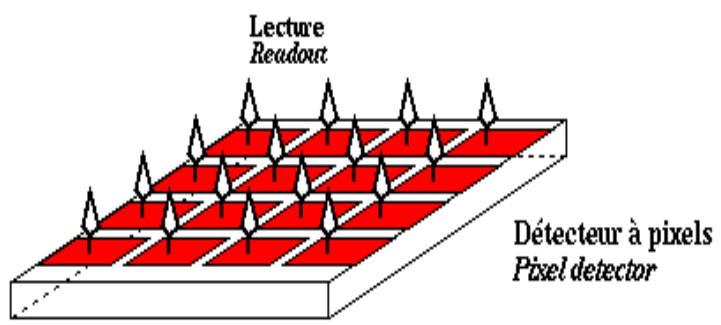
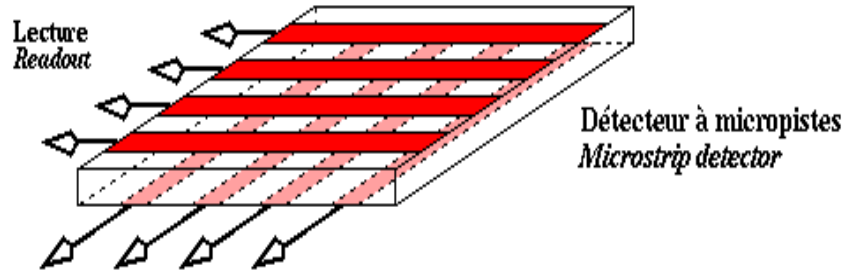
768 micropistes de 20 μm de large

Lecture tous les 80 μm

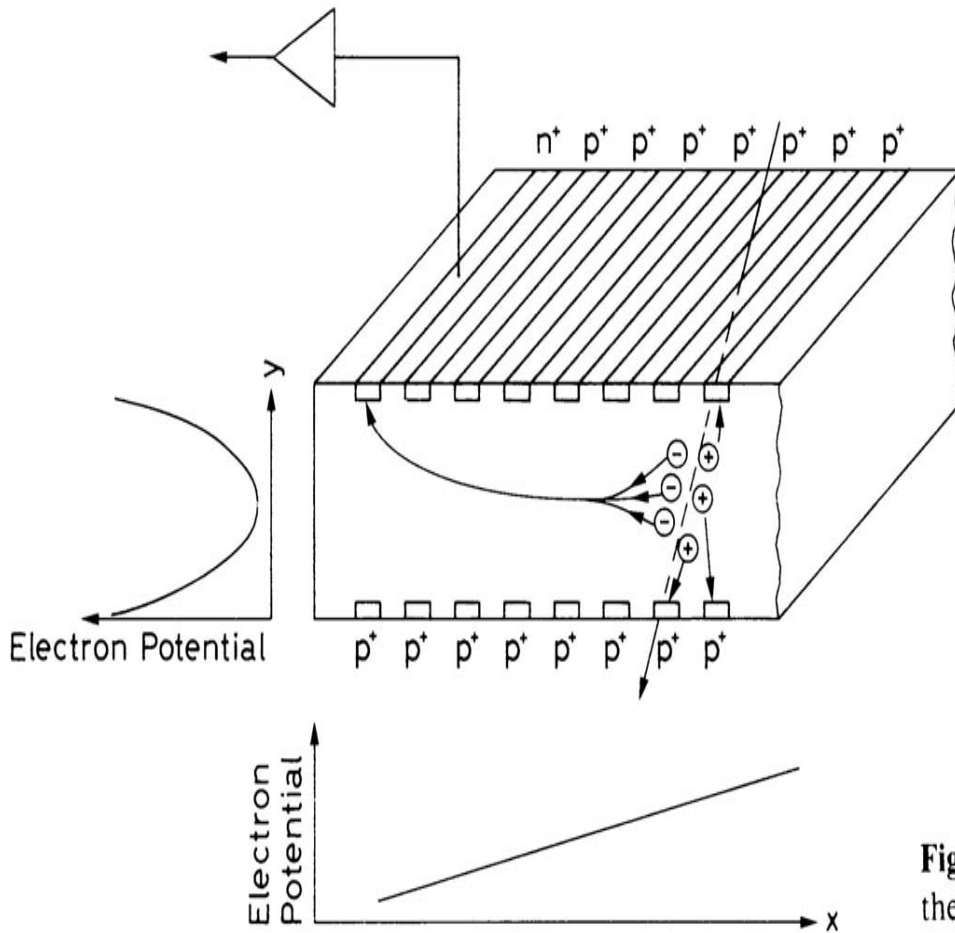
Épaisseur 300 μm



Les détecteurs à Pixels



Les détecteurs à dérivation



Structure PNP

- Qui produit un puit de potentiel
- Les électrons dérivent vers l'électrode de lecture en 100 ns à 100 μ s.

Fig. 10.
the silic

Détecteurs au Silicium

Utilisation en physique nucléaire

Mesures d'énergie
(Grande dynamique)

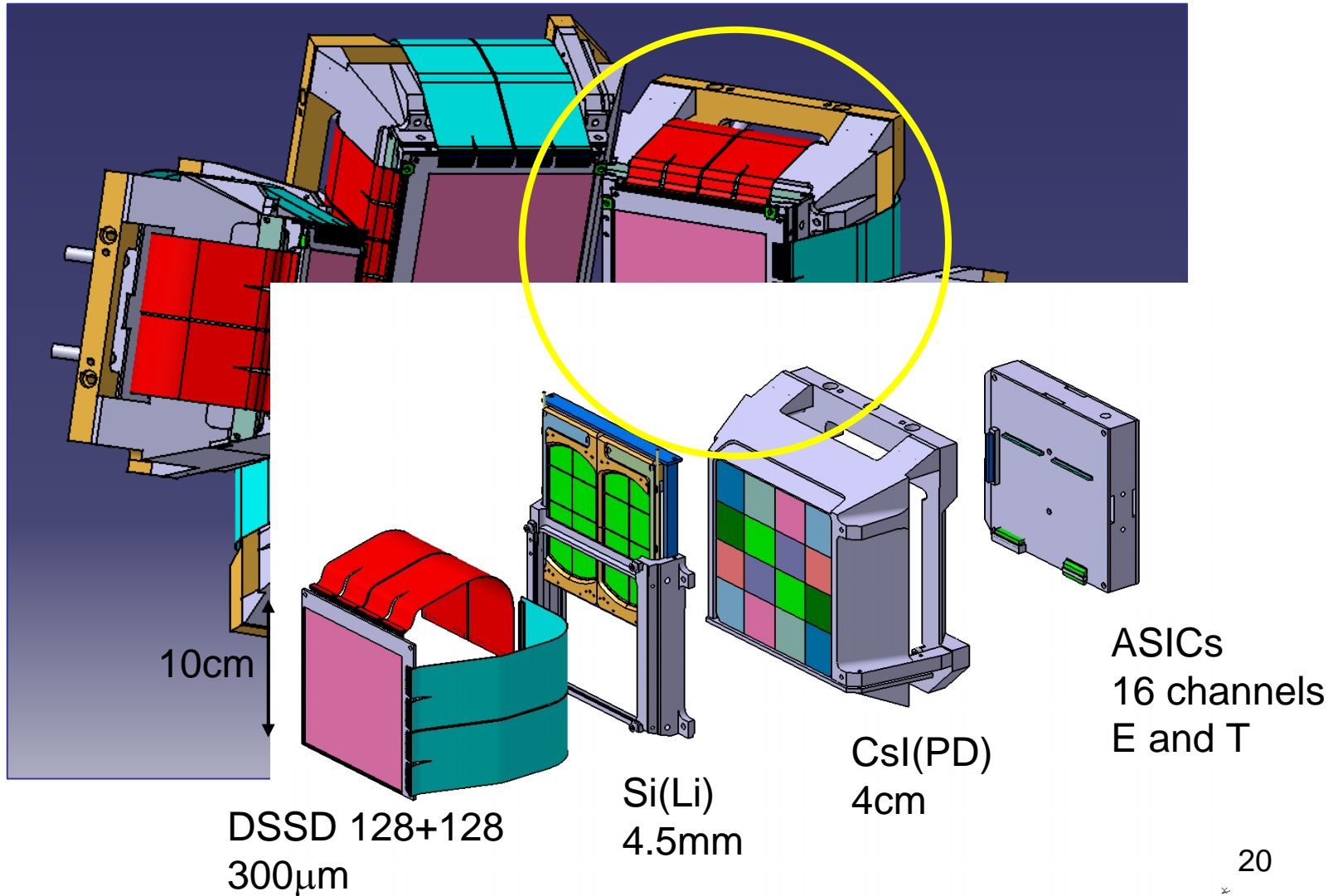
Mesures de temps

Mesures de position
(Segmentation en pistes)

Identification de noyaux
Perte Energie / Energie
Energie / Temps de vol
Forme d'impulsion

The Array

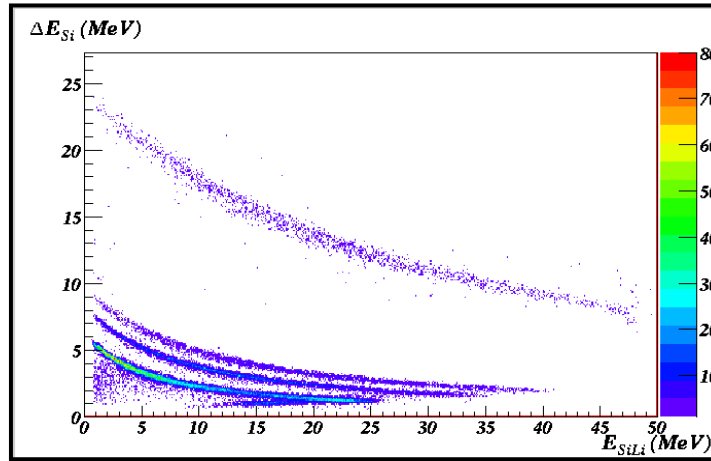
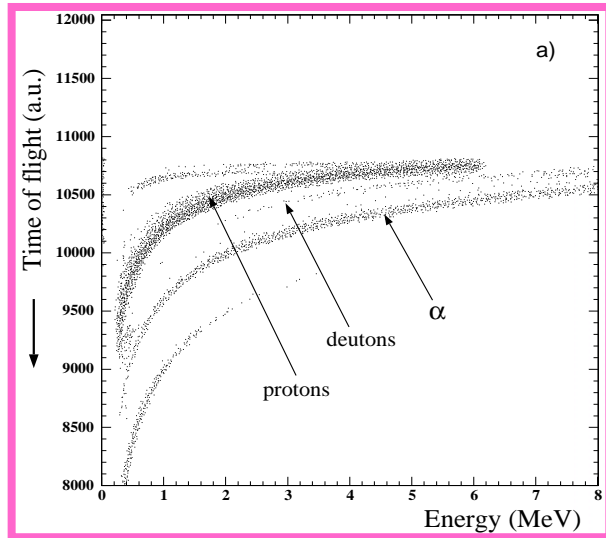
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL



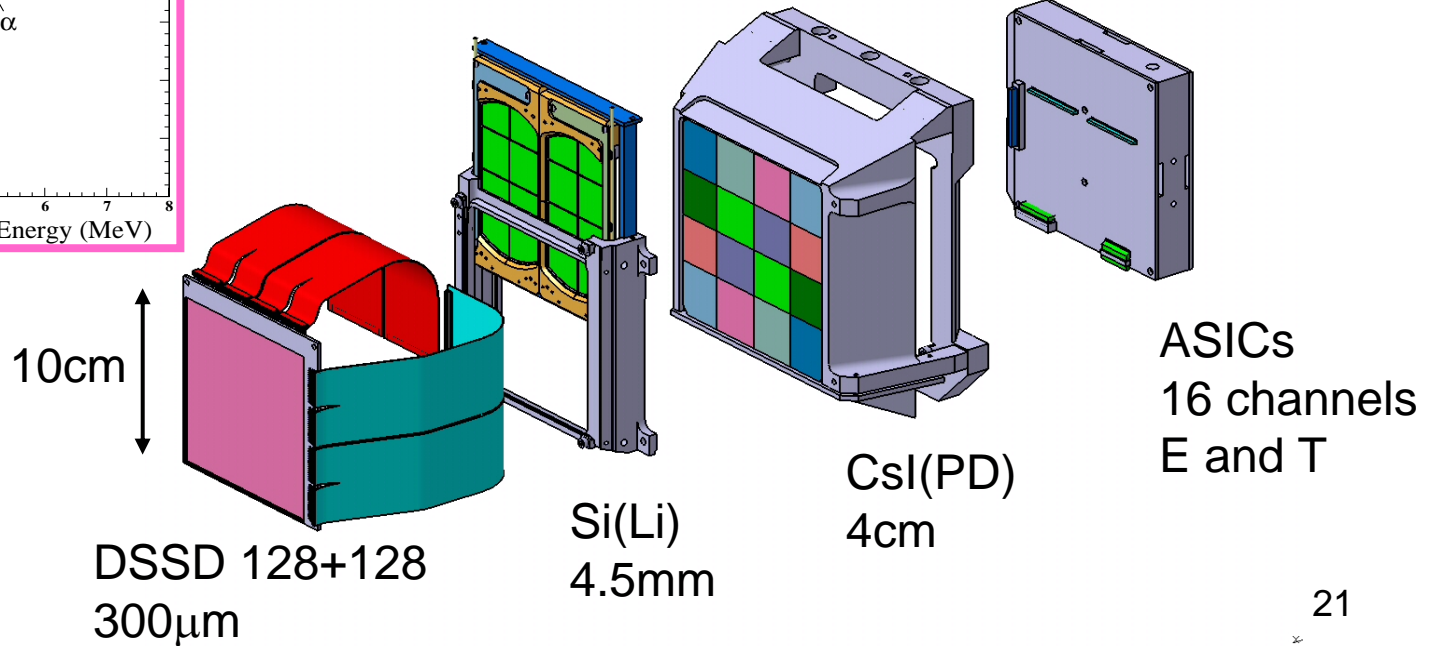
The MUST2 Array

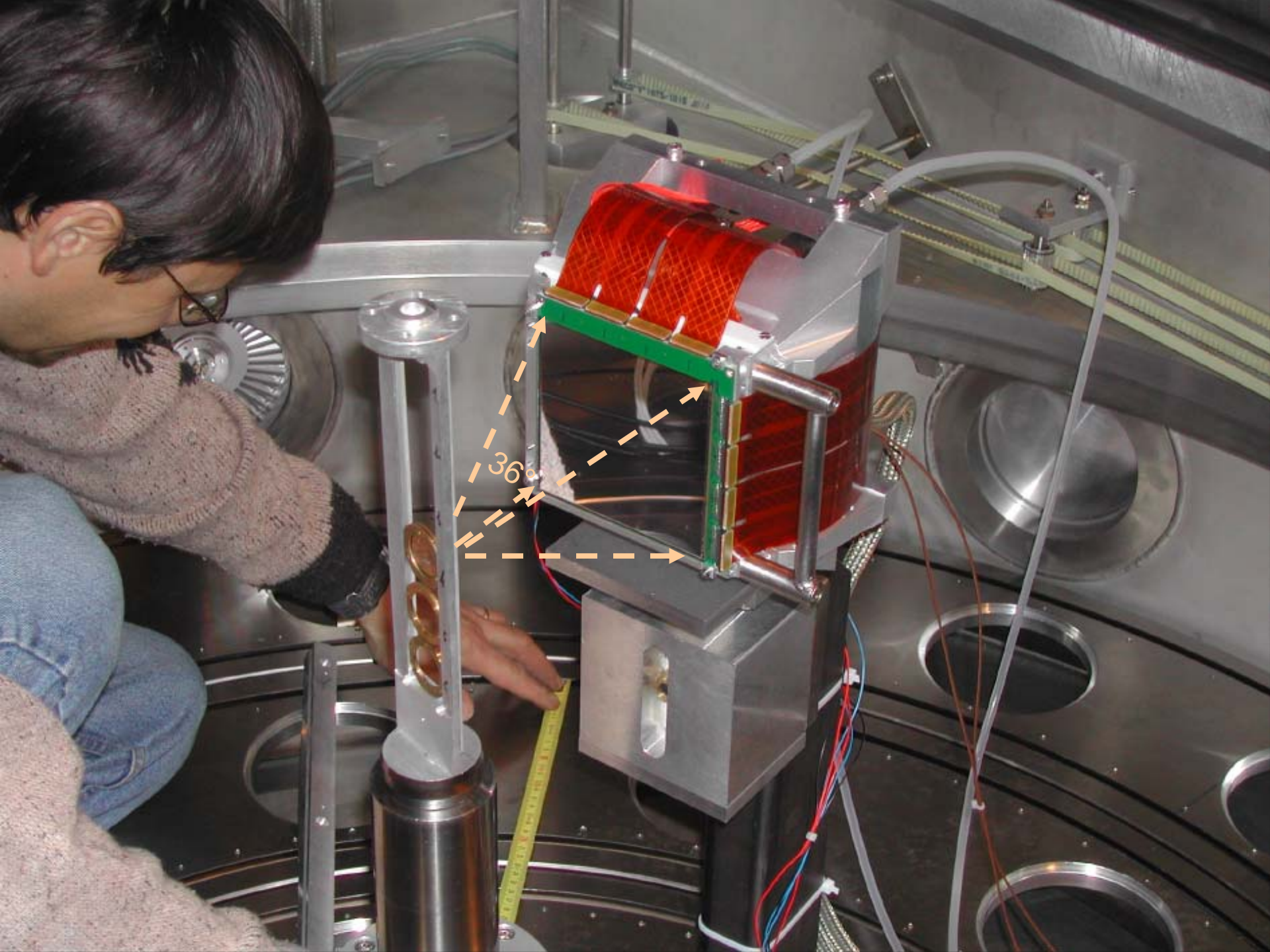
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL

Temps de Vol
Energie



Perte d'énergie
Energie

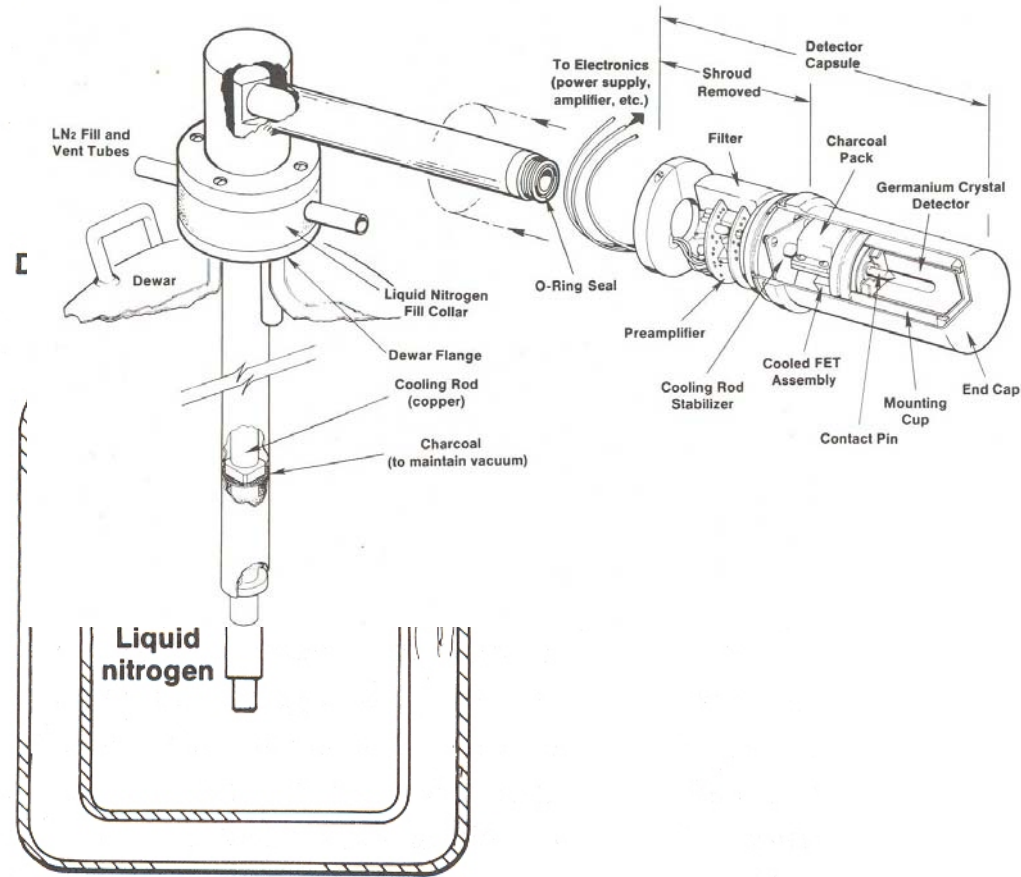




36°

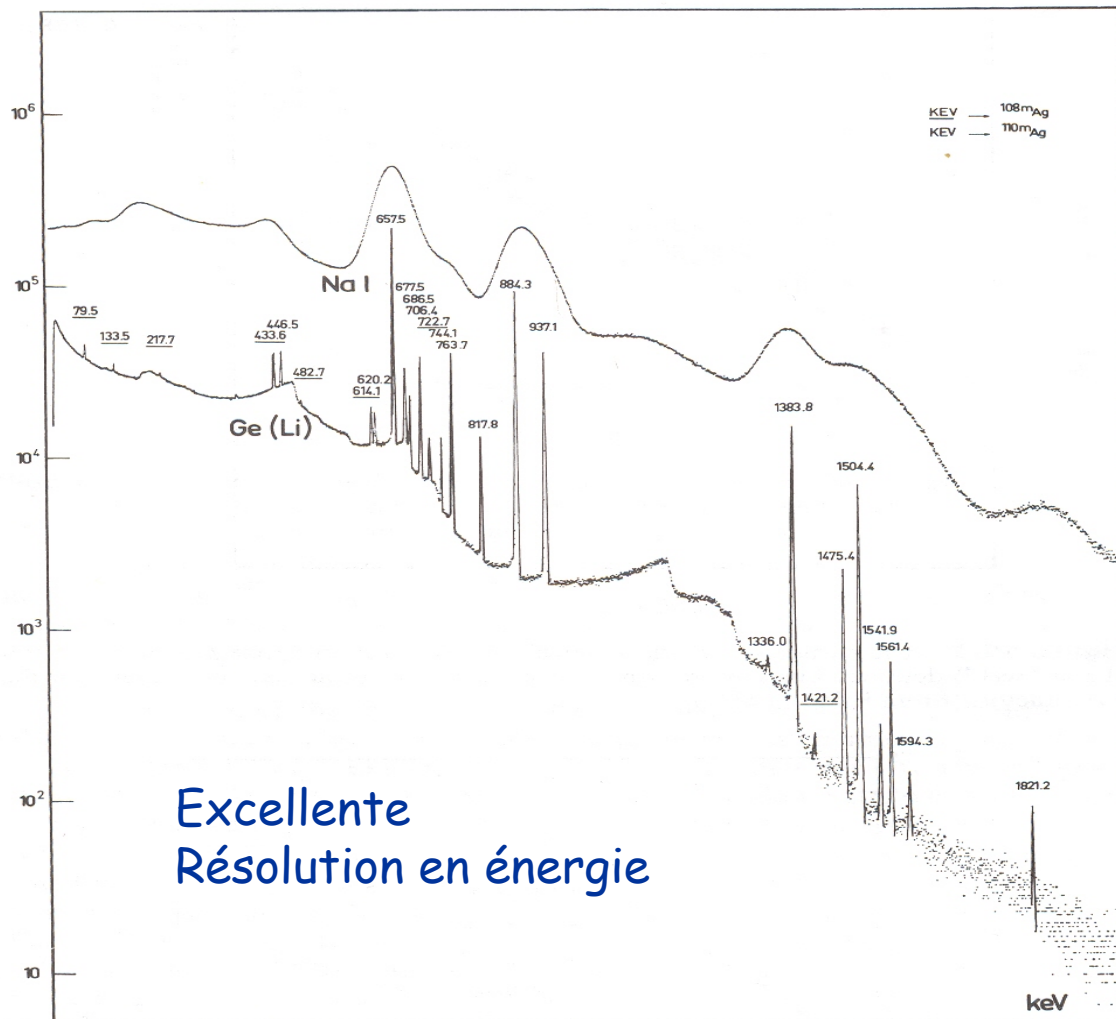
Détecteurs au Germanium

Détection de photons



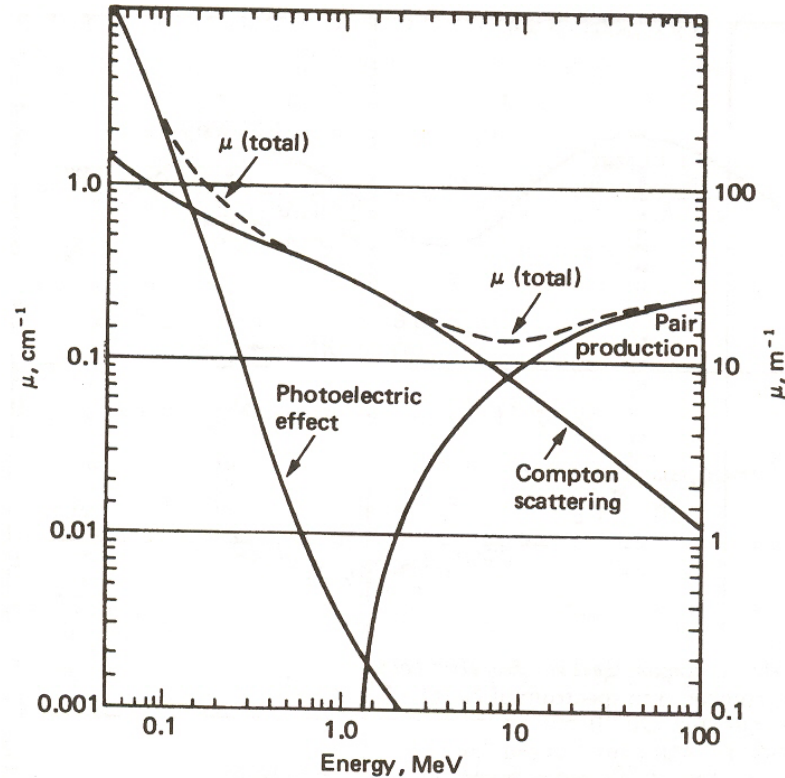
Détecteurs au Germanium

Détection de photons



Détecteurs au Germanium

Détection de photons

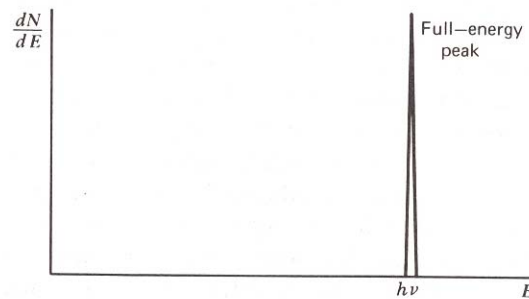
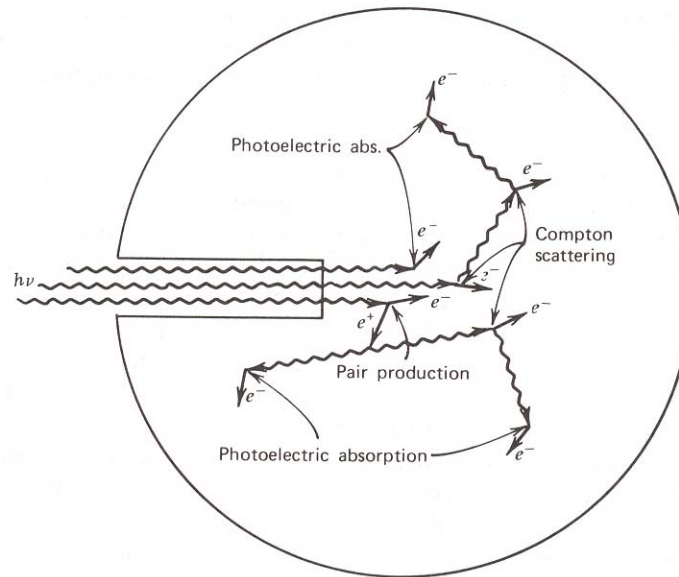


Coefficients d'atténuation dans le Germanium

Détecteurs au Germanium

Détection de photons

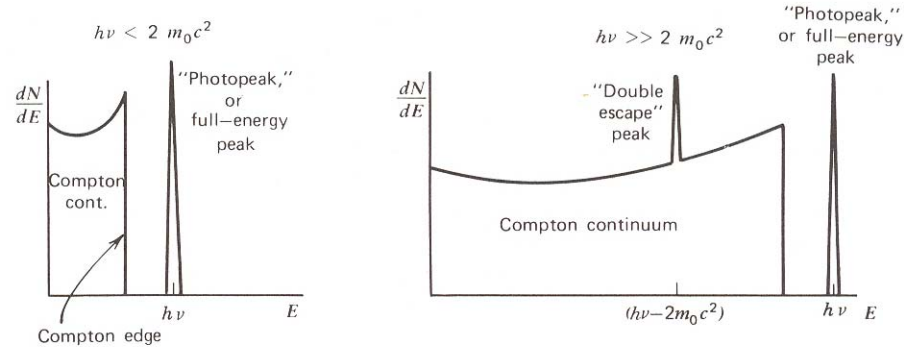
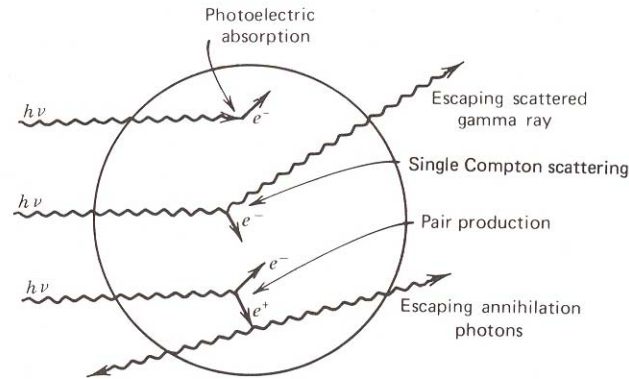
Détecteur
de grand volume



Détecteurs au Germanium

Détection de photons

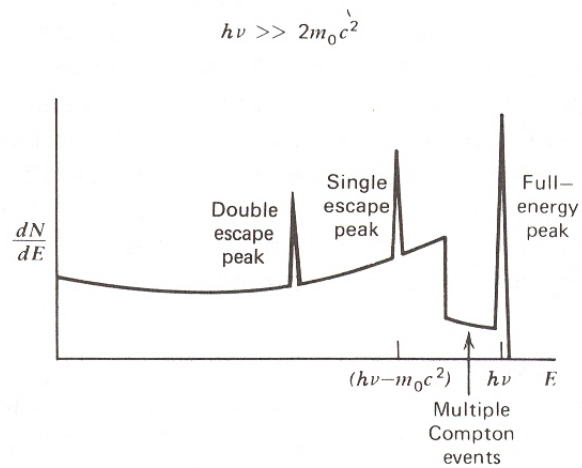
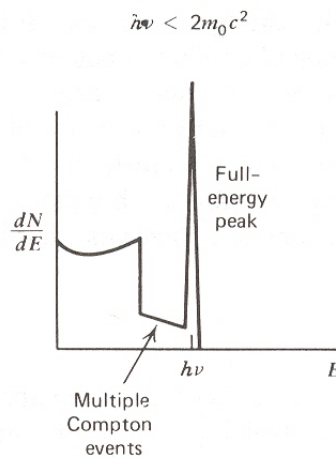
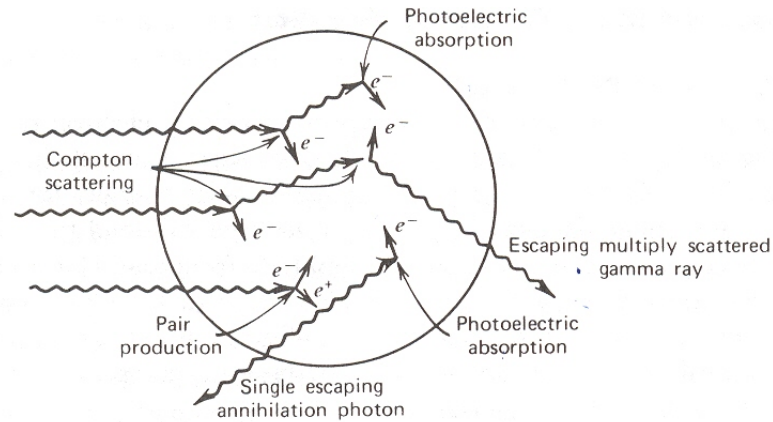
Détecteur
de petit volume



Détecteurs au Germanium

Détection de photons

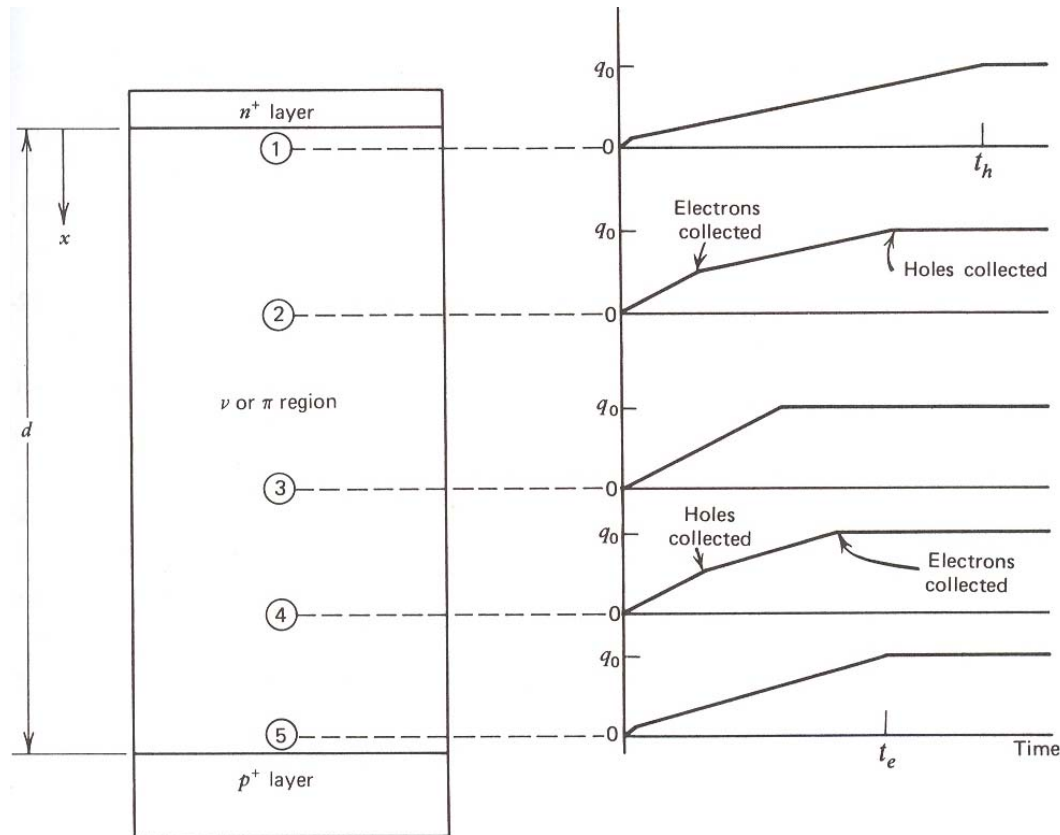
Détecteur
de « volume moyen »



Détecteurs au Germanium

Détection de photons

Forme d'impulsion (en charge) pour différents points d'interaction



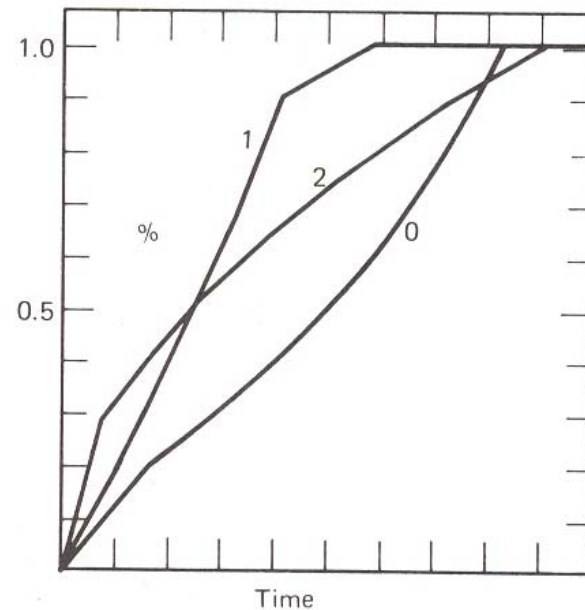
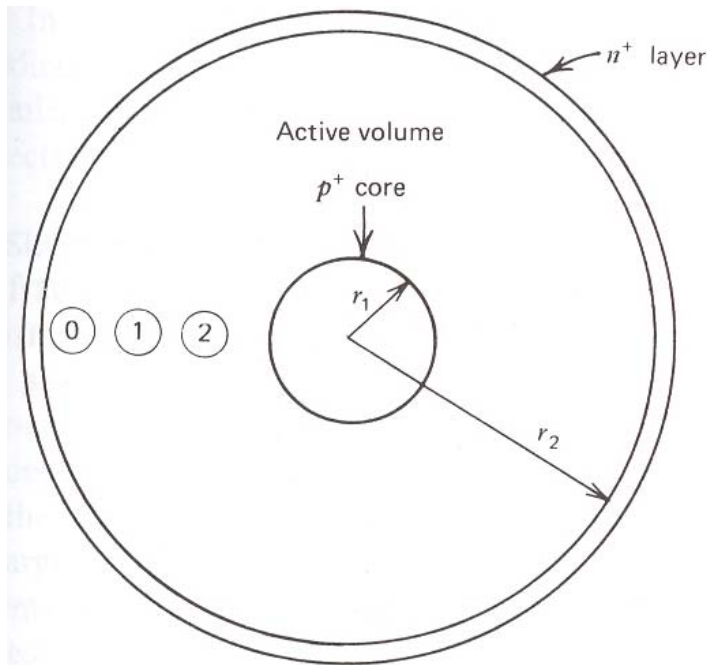
Détecteur planaire

Extrait du livre de Knoll
(Modèle simplifié)

Détecteurs au Germanium

Détection de photons

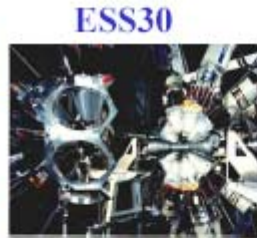
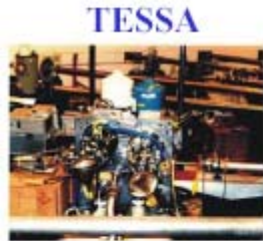
Forme d'impulsion (en charge) pour différents points d'interaction



Détecteur coaxial

Extrait du livre de Knoll
(Modèle simplifié)

Arrays from TESSA0 to AGATA



John Simpson , Nuclear Physics Group

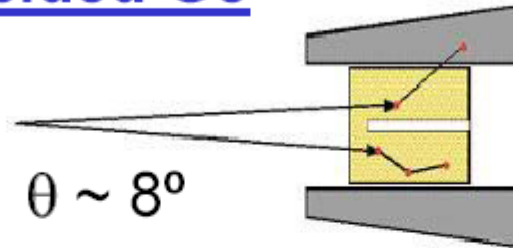
Idea of γ -ray tracking

Compton Shielded Ge

$\epsilon_{ph} \sim 10\%$

$N_{det} \sim 100$

$\Omega \sim 40\%$

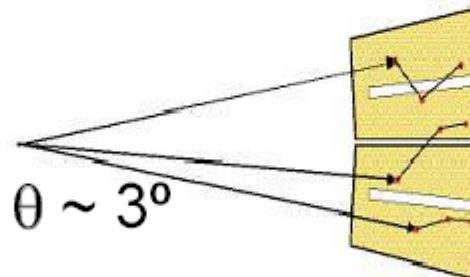


large opening angle
means poor energy
resolution at high
recoil velocity

Ge Sphere

$\epsilon_{ph} \sim 50\%$

$N_{det} \sim 1000$



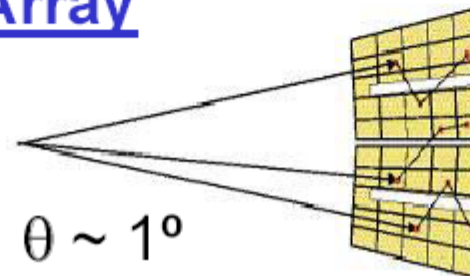
too many detectors
are needed to avoid
summing effects

Ge Tracking Array

$\epsilon_{ph} \sim 50\%$

$N_{det} \sim 100$

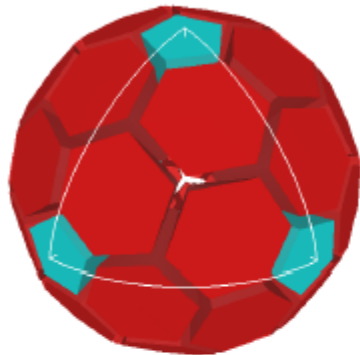
$\Omega \sim 80\%$



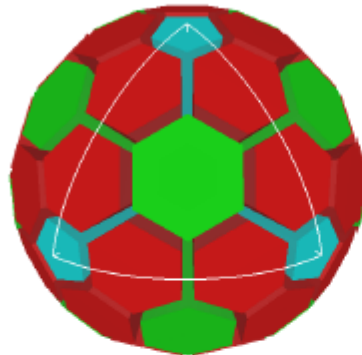
Combination of:

- segmented detectors
- digital electronics
- pulse processing
- tracking the γ -rays

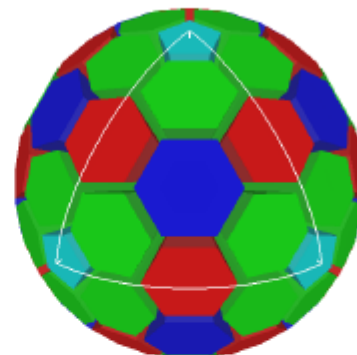
Geodesic Tiling of Sphere using 60–240 hexagons and 12 pentagons



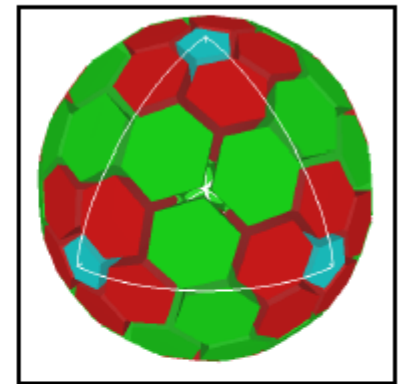
60



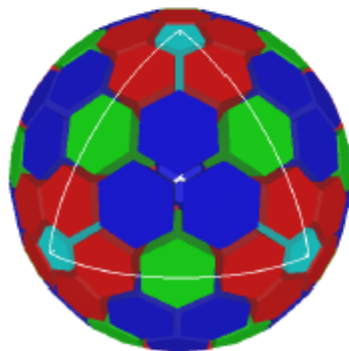
80



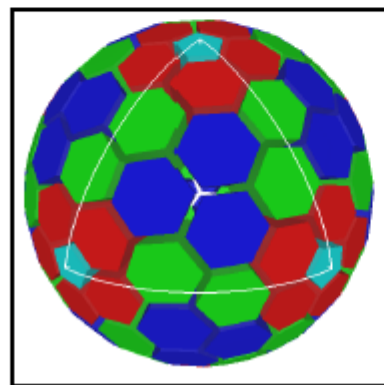
110



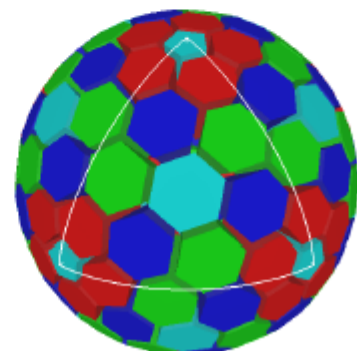
120



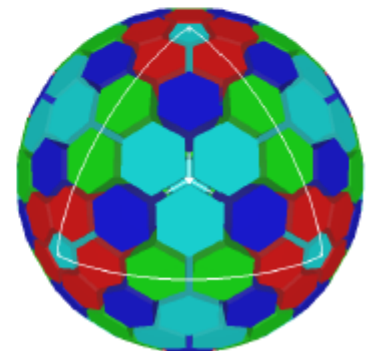
150



180

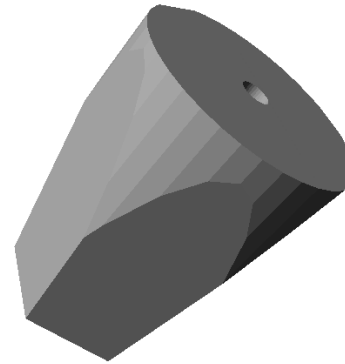
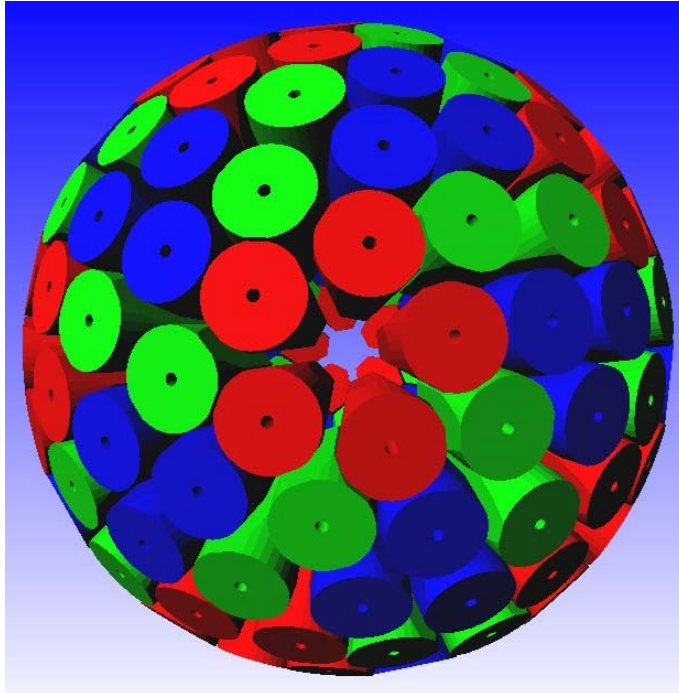


200



240

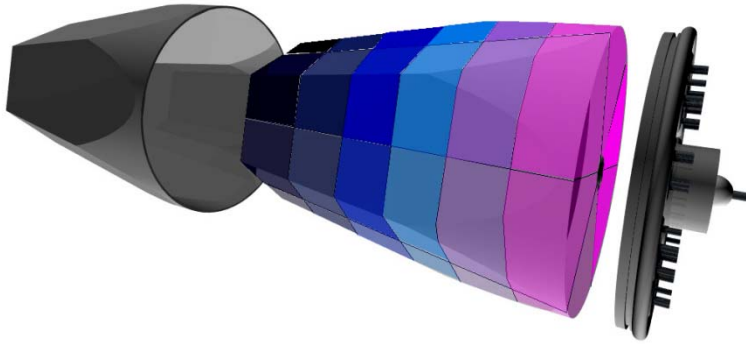
The 4π 180 detector Configuration



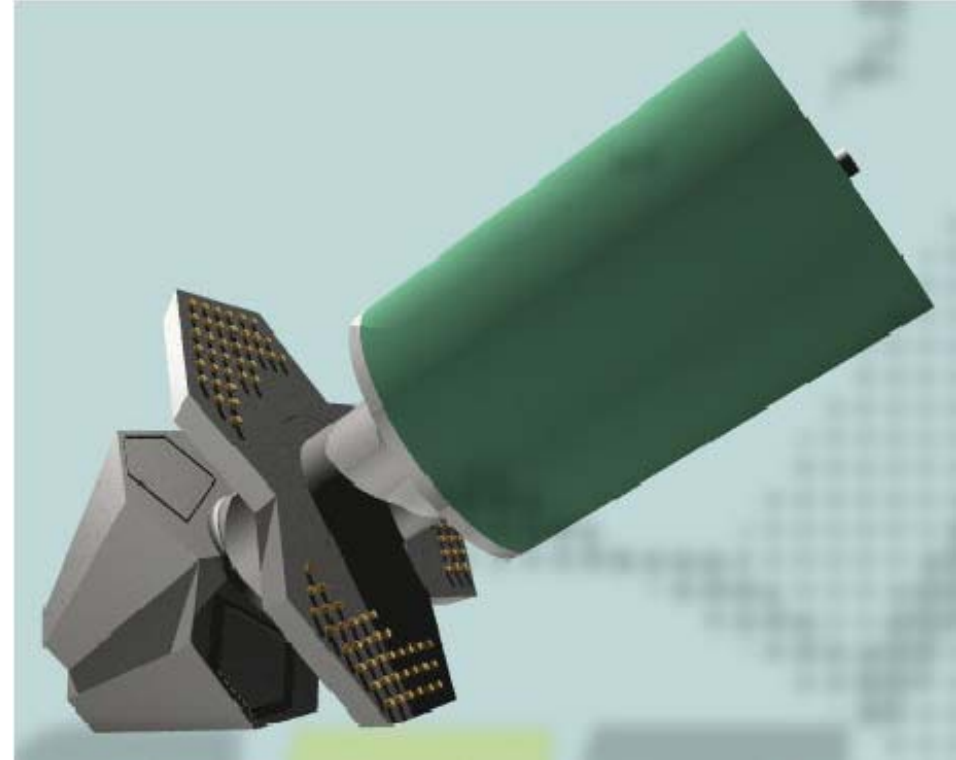
180 hexagonal crystals	3 shapes
60 triple-clusters	all equal
Inner radius (Ge)	23.1 cm
Amount of germanium	362 kg
Solid angle coverage	82 %
Singles rate	~50 kHz
6480 segments	

Efficiency:	43% ($M_\gamma=1$)	28% ($M_\gamma=30$)
Peak/Total:	58% ($M_\gamma=1$)	49% ($M_\gamma=30$)

AGATA Detectors



Hexaconical Ge crystals
90 mm long
80 mm max diameter
36 segments



3 encapsulated crystals
111 preamplifiers with cold FET



The First Step: The AGATA Demonstrator

Objective of the final R&D phase 2003-2008

1 symmetric triple-cluster
5 asymmetric triple-clusters

36-fold segmented crystals

540 segments

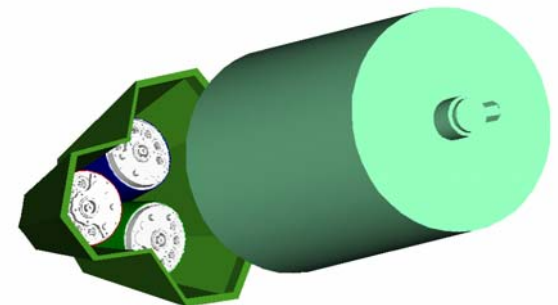
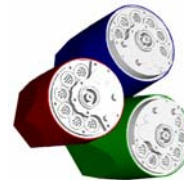
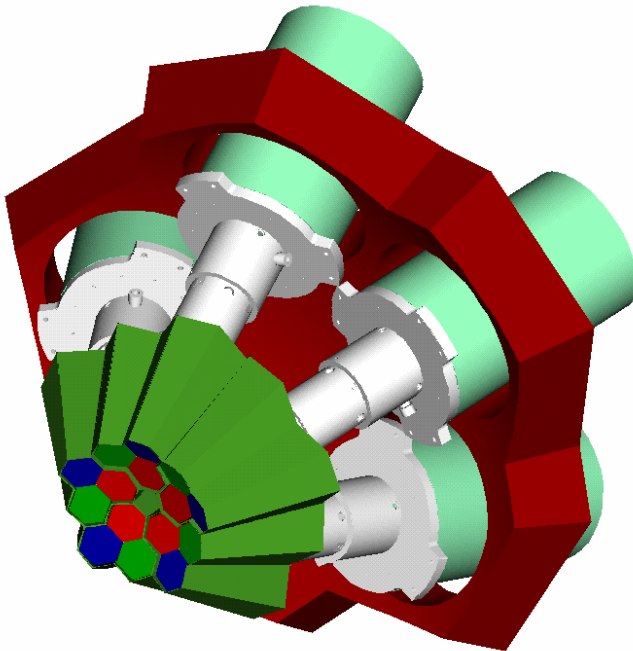
555 digital-channels

Eff. 3 - 8 % @ $M_\gamma = 1$

Eff. 2 - 4 % @ $M_\gamma = 30$

Full ACQ

with on line PSA and γ -ray tracking



Détecteurs à émission de lumière

1- Emission de lumière (retour à l'équilibre du milieu)

Scintillateurs

Effet Cerenkov (non traité dans ce cours)

2- Collection de la lumière

3- Photo-détecteur : transformation en signal électrique

Avec des illustrations extraites du cours de
Christian Joram CERN, Summer Student Lectures 2001

Scintillateurs

Deux grandes familles



Scintillateurs
Inorganiques

Cristaux

Généralement

- Z et densité élevés
- Beaucoup de lumière
- Faible rapidité

Gaz nobles (Ar, Kr, Xe)
utilisés à l'état liquide

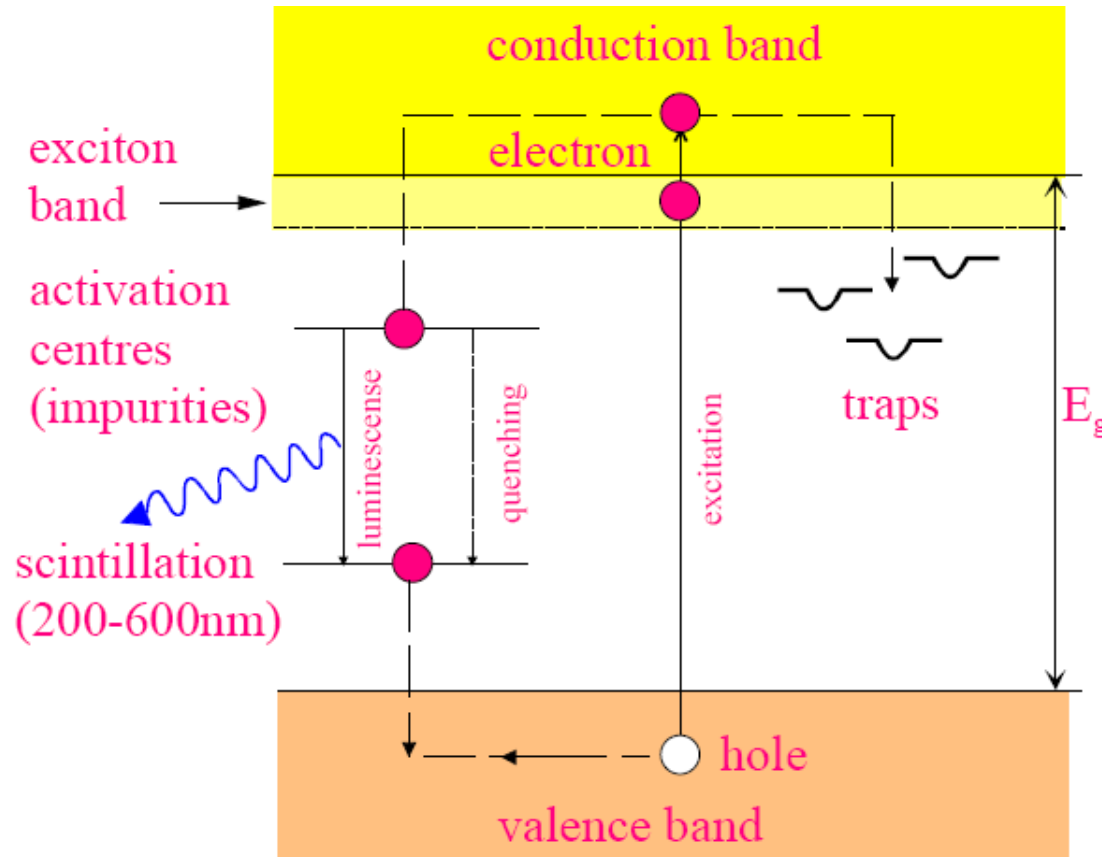
Scintillateurs
Organiques

Molécules aromatiques

- Z moyen faible
- Densité voisine de 1
- Moins de lumière
- Mais plus rapide

Scintillateurs inorganiques

Principe



Scintillateurs inorganiques

Principales propriétés

Composition & densité

Indice & Longueur d'onde

Constantes de temps

Quantité de lumière

scintillator composition	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (μs)	scintillation pulse height ¹⁾	notes	Photons/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190	2)	4 × 10 ⁴
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	3)	
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	3)	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	3)	1.1 × 10 ⁴
CaI(Na)	4.51	1.84	420	0.63	85	3)	
KI(Tl)	3.13	1.71	410	0.24/2.5	24	3)	1.4 × 10 ⁴
⁶ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	3)	
CaF ₂ (Eu)	3.19	1.44	435	0.9	50		6.5 × 10 ³ 2 × 10 ³
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8 × 10 ³
CaWO ₄	6.12	1.92	430	0.5/20	50		
ZnWO ₄	7.87	2.2	480	5.0	26		
CdWO ₄	7.90	2.3	540	5.0	40		
CsF	4.65	1.48	390	0.005	5	3)	
CeF ₃	6.16	1.68	300 340	0.005 0.020	5		
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	0.2	150	4)	
GSO	6.71	1.9	440	0.060	20		
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.0004	40	4)	
YSO	4.45	1.8	420	0.035	50		
YAP	5.50	1.9	370	0.030	40		

¹⁾ relative to NaI(Tl) ²⁾ at 80 K ³⁾ hygroscopic ⁴⁾ polycrystalline

PbWO ₄	8.28	1.82	440, 530	0.01			100
-------------------	------	------	----------	------	--	--	-----

(Table extraite du livre de Knoll, ajout de Joram)

Scintillateurs inorganiques

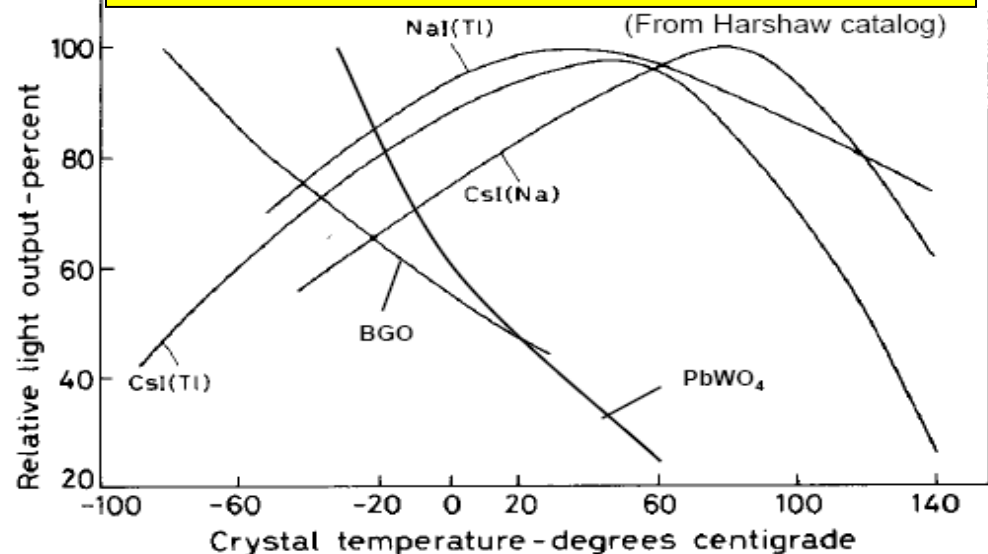
Principales propriétés

	LaBr ₃	LaCl ₃	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI(Na)	BGO	LYSO	PWO	CsI _(pure) *	
Density (g/cm ³)	5.29	3.86	3.67	4.51	4.51	7.13	7.10	8.29	4.51	
Light Output (ph/MeV)	63,000	49,000	39,000	52,000	45,000	9000	32,000	100	16,800	
$\Delta E/E$ (FWHM) @662 keV	PMT	<3%	3.5%	7%	6%	7.5%	10%	7.1%	>10%	7.5%
	APD	N/A	N/A							
Peak λ (nm)	380	350 430	380	415	415	415	415	415	415	
Fast Decay (ns)	25	25/213	62	62	62	62	62	62	62	
Hygroscopic	yes	yes								
Cost (per cm ³)	\$30	\$30								
Radiation length (cm)	N/A	N/A								

*

Ordres de grandeur, dépendent fo

Light output variation with temperature



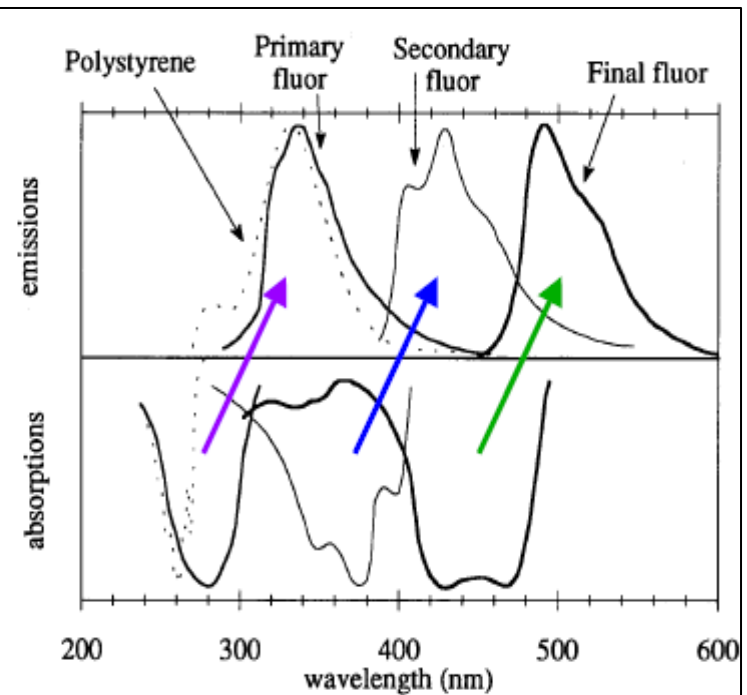
Scintillateurs organiques

Molécules aromatiques (formées sur le cycle du benzène)
Etat cristallin, liquide ou plastique

Molecular states

Some widely used solvents and solutes

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



Scintillateurs organiques

Table A6.3 Properties of some organic scintillators

scintillator	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (ns)	scintillation pulse height ¹⁾	H/C ratio ²⁾	yield/ NaI	
Monocrystals								
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800	0.5	
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714		
trans-stilbene	1.16	1.58	384	3-8	46	0.857		
p-terphenyl	1.23		391	6-12	30	0.778		
Plastics ³⁾								
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105	0.5	
NE 104	1.032	1.58	405	1.8	68	1.100		
NE 110	1.032	1.58	437	3.3	60	1.105		
NE 111	1.032	1.58	370	1.7	55	1.096		
Plastics ⁴⁾								
BC-400	1.032	1.581	423	2.4	65	1.103		
BC-404	1.032	1.58	408	1.8	68	1.107		
BC-408	1.032	1.58	425	2.1	64	1.104		
BC-412	1.032	1.58	434	3.3	60	1.104		
BC-414	1.032	1.58	392	1.8	68	1.110		
BC-416	1.032	1.58	434	4.0	50	1.110		
BC-418	1.032	1.58	391	1.4	67	1.100		
BC-420	1.032	1.58	391	1.5	64	1.100		
BC-422	1.032	1.58	370	1.6	55	1.102		
BC-422Q	1.032	1.58	370	0.7	11	1.102		
BC-428	1.032	1.58	480	12.5	50	1.103		
BC-430	1.032	1.58	580	16.8	45	1.108		
BC-434	1.049	1.58	425	2.2	60	0.995		

¹⁾ relative to anthracene

²⁾ ratio of hydrogen to carbon atoms

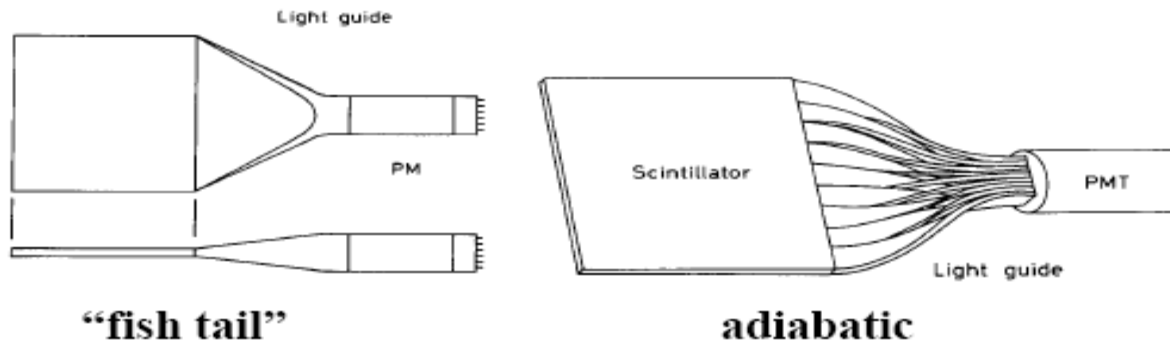
³⁾ Nuclear Enterprises Ltd. Sighthill, Edinburgh, U.K.

⁴⁾ Bicron Corporation, Newbury, Ohio, USA

« Collection de la lumière »

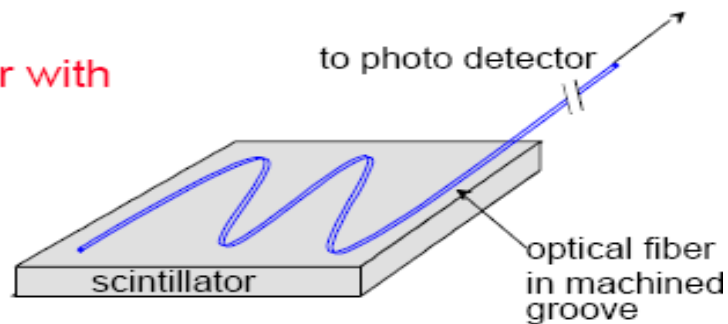
Adaptation à la géométrie et à la sensibilité (longueur d'onde) du photo-détecteur

- ◆ Light guides: transfer by total internal reflection
(+outer reflector)



- ◆ wavelength shifter (WLS) bars

readout of a scintillator with a fiber (schematically)



« Collection de la lumière »

Exemple: 8 « Octants » de l'Expérience G0 au Jefferson Laboratory (USA)

Champ magnétique
(8 secteurs)

16 paires
Scintillateur
(BC 408)

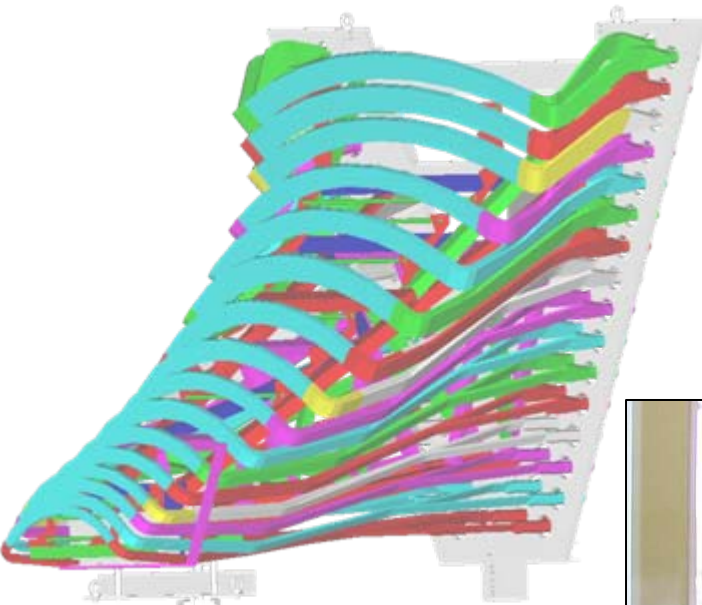


Photo- détecteurs

Fonction : Convertir la lumière en signal électrique

Principaux types utilisés en physique nucléaire

Photomultiplicateurs
Semi-conducteurs

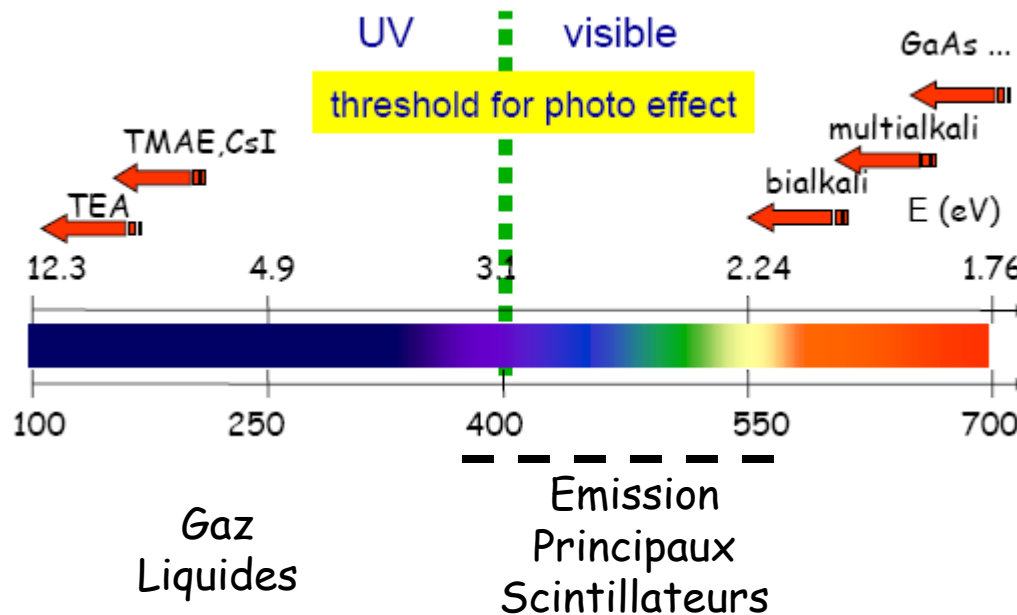
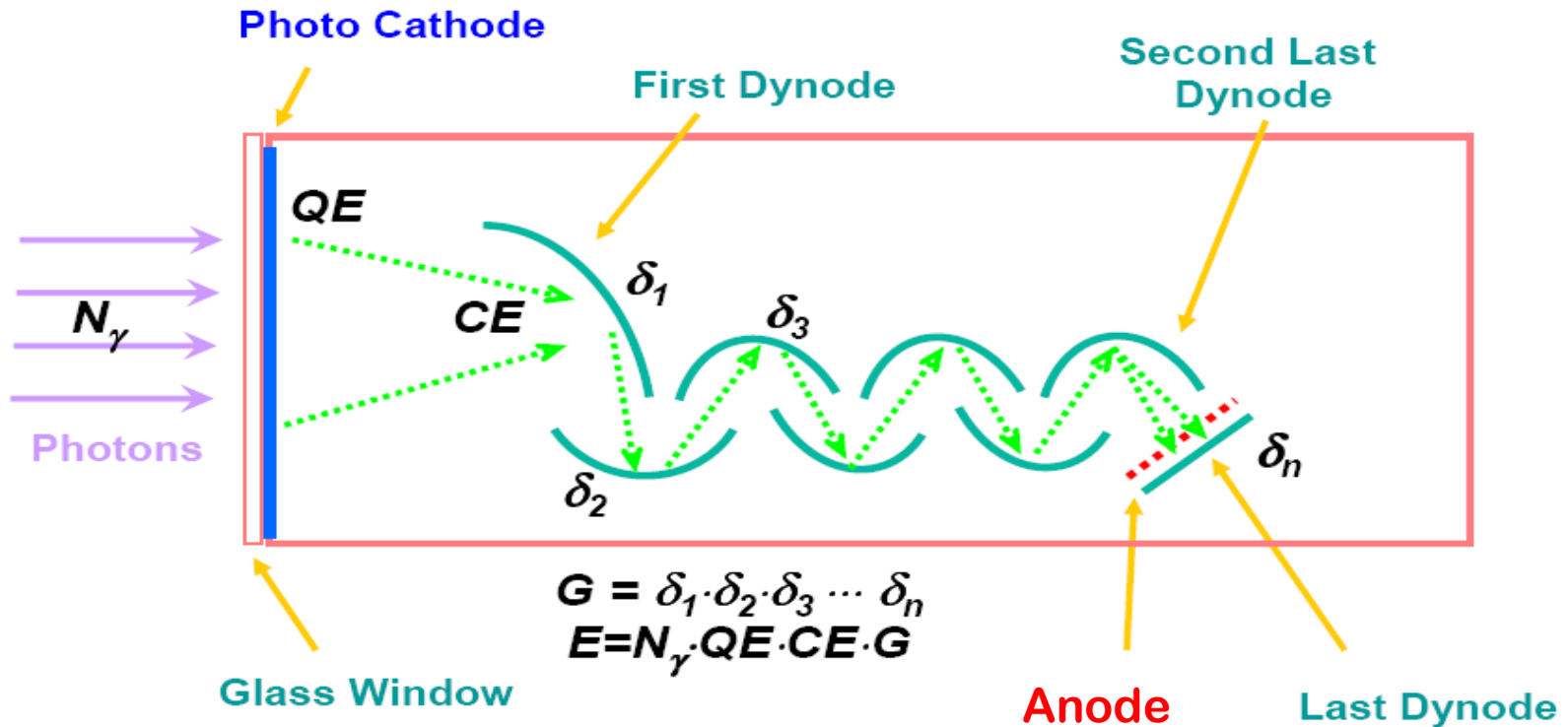


Photo- détecteurs

Photomultiplicateurs



Photocathode
QE

Collection
CE

Dynodes

dynode gain $g=3-50$ ($f(E)$)

total gain $M = \prod_{i=1}^N g_i$

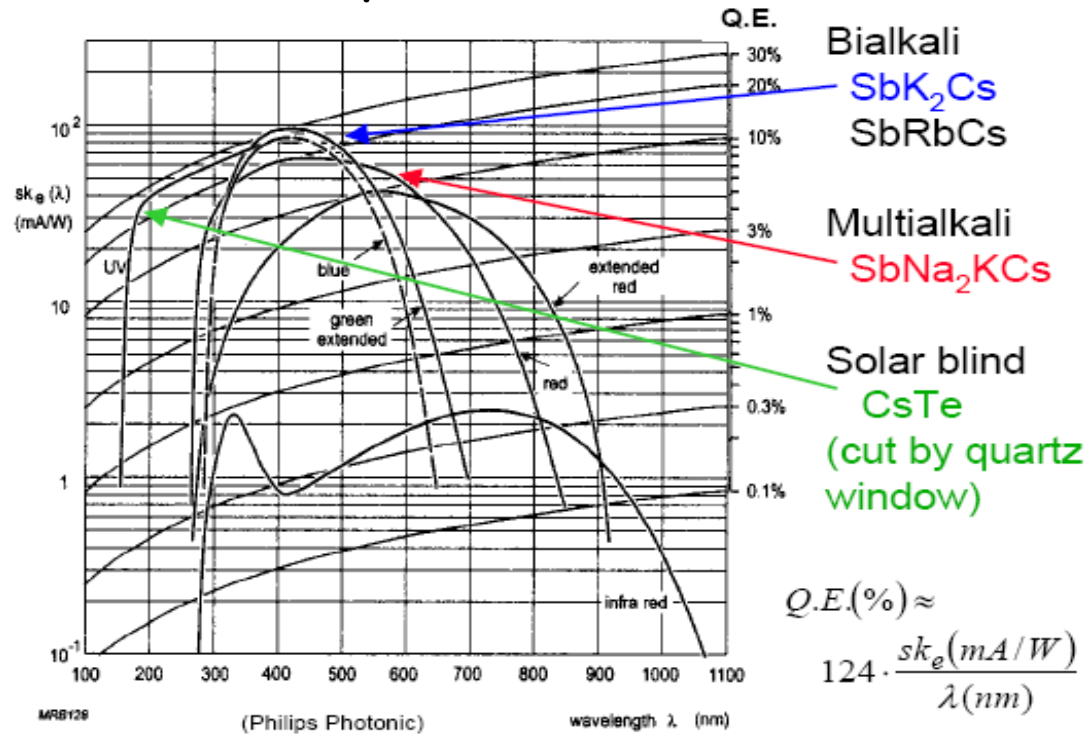
10 dynodes with $g=4$

$M = 4^{10} \approx 10^6$

Photo- détecteurs

Photomultiplicateurs

Efficacité quantique
(Q.E.)



Fenêtre d'entrée
(transmission de la lumière)

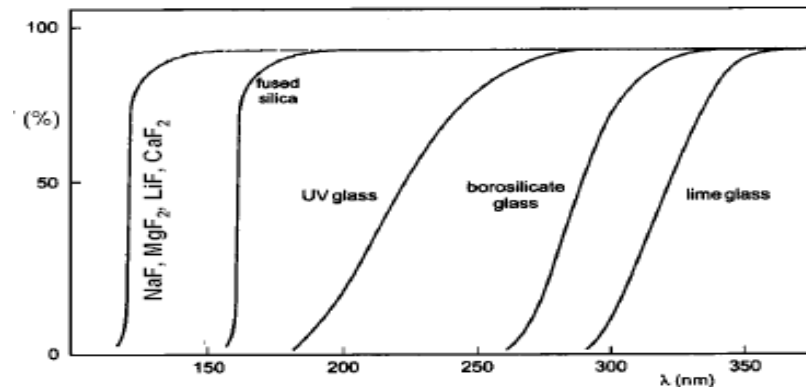


Photo- détecteurs

Photomultiplicateurs

Photocatode

Bialkali

Sb- Rb- Cs

Sb- K- Cs

+ Verre

- Ⓐ: Borosilicate Glass
- Ⓑ: UV Glass
- Ⓒ: Synthetic Silica
- Ⓓ: Bialkali Photocathode
- Ⓔ: High Temp. Bialkali Photocathode
- Ⓕ: Extended Green Bialkali Photocathode

+ Scintillateur

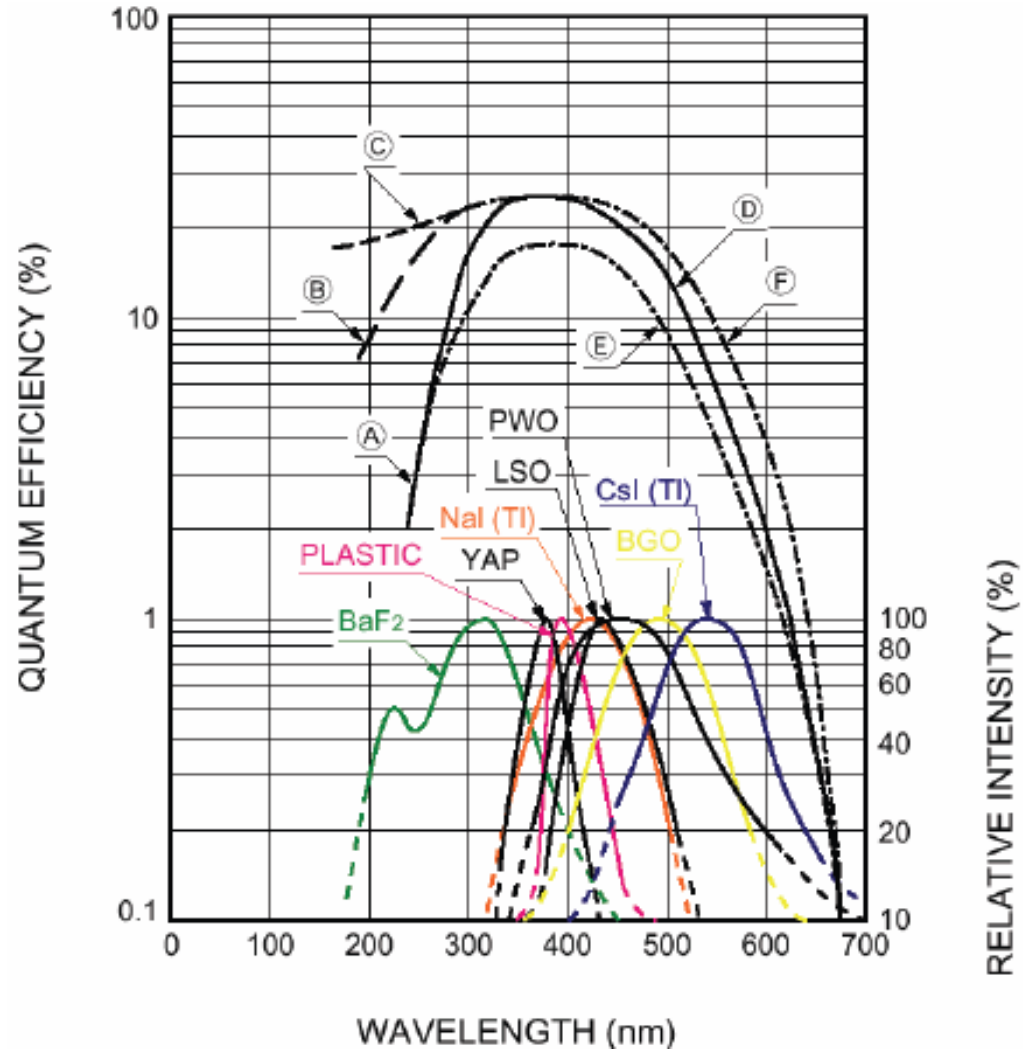


Photo- détecteurs

Photomultiplicateurs Energy Resolution (σ/E)

➤ In ideal case:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\sqrt{N_\gamma}}{N_\gamma} = \sqrt{\frac{1}{N_\gamma}}$$

➤ In reality:

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{ENF}{N_\gamma \cdot QE \cdot CE} + \left(\frac{ENC}{N_\gamma \cdot QE \cdot CE \cdot G_P} \right)^2}$$

- QE
- C_{ol}
- ENF
- ENC

Quantum Efficiency
Collection Efficiency:
Excess Noise Factor (from Dynodes)
Equivalent Noise Charge (Readout Noise)

➤ Definition:

$$ENF \equiv \frac{\sigma_{Output}^2}{\sigma_{Input}^2}$$

➤ In case of PMT:

$$ENF = 1 + \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_1 \cdot \delta_2} + \dots + \frac{1}{\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n}$$

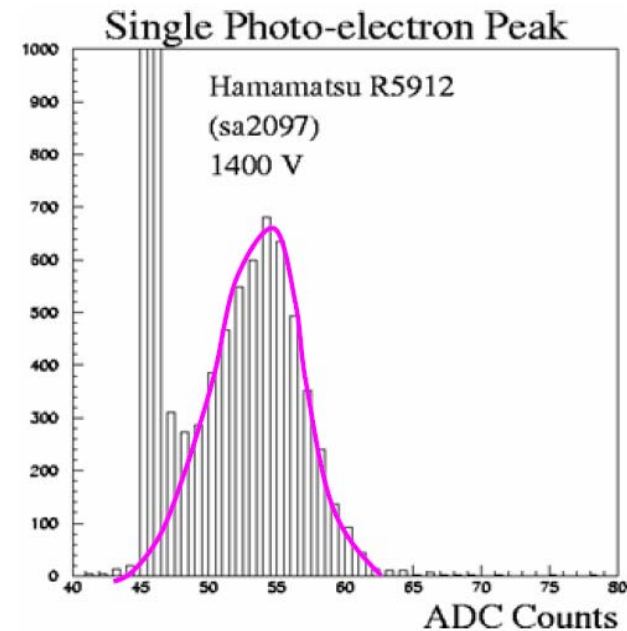


Photo- détecteurs

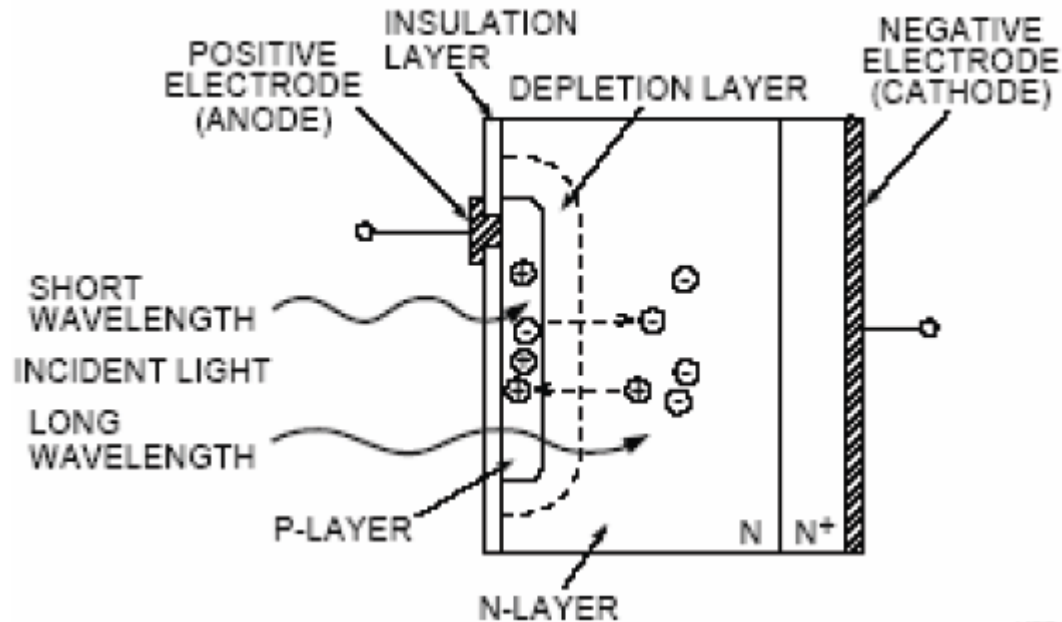
Photomultiplicateurs



Photo-détecteurs

Semi-conducteurs

Photodiode



Avantage : bonne efficacité quantique (QE)
Inconvénient : gain de 1

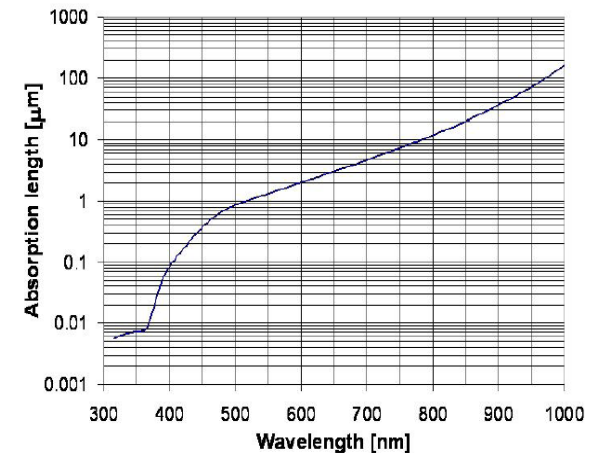


Photo- détecteurs

Semi-conducteurs

Avalanche Photo Diode (APD)

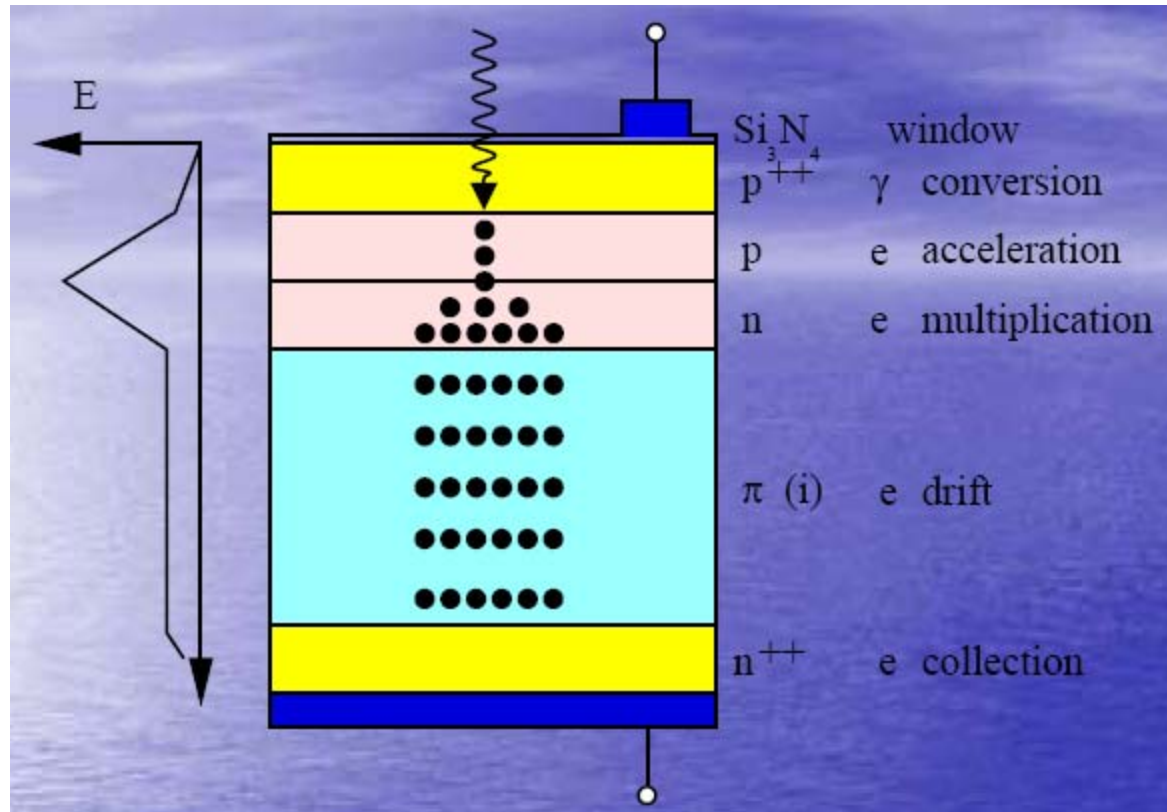
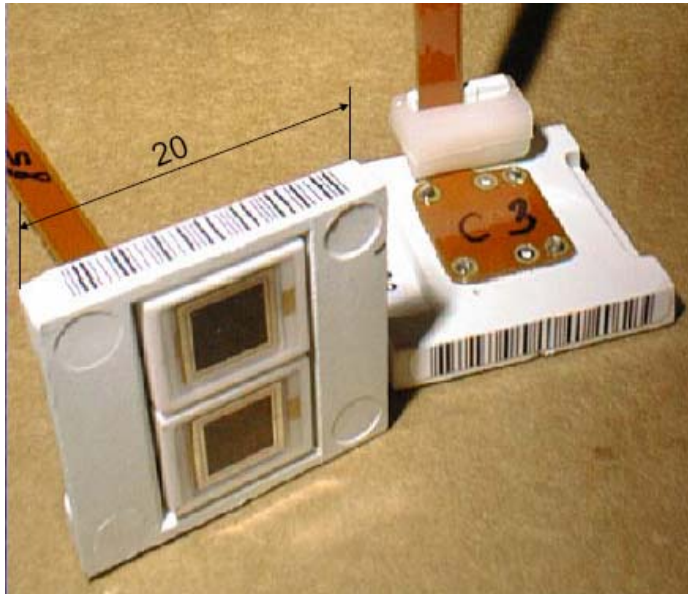


Photo- détecteurs

Semi-conducteurs

Avalanche Photo Diode (APD)



APD du calorimètre CMS
(5x5 mm²)

Inconvénient

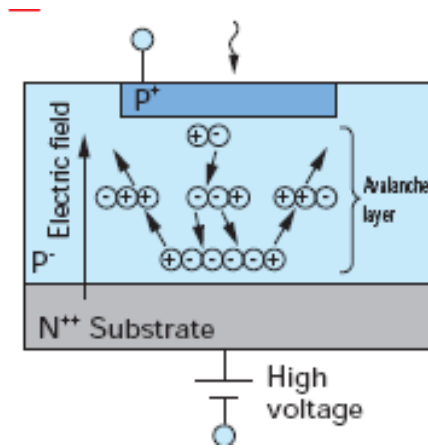
Operating Voltage @ M=50	~380 V
Capacitance @ M=50	80 pF
Serial Resistance	3 Ω
Dark Current @ M=50	< 10 nA
Excess Noise Factor @ M=50	~2
Quantum Efficiency @ 470 nm	80 %
dM/dV x 1/M @ M=50	3.0 %/V
dM/dT x 1/M @ M=50	-2.4 %/K

Photo-détecteurs

Semi-conducteurs

SiPM - APD Multipixels en mode Geiger

Autres noms : MPGM, MPPC...

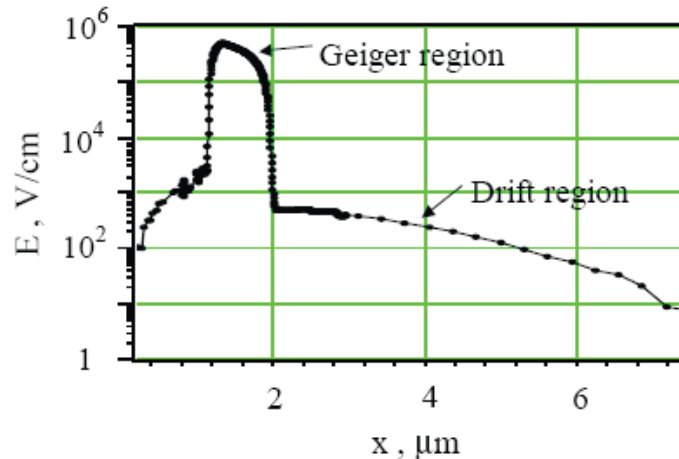
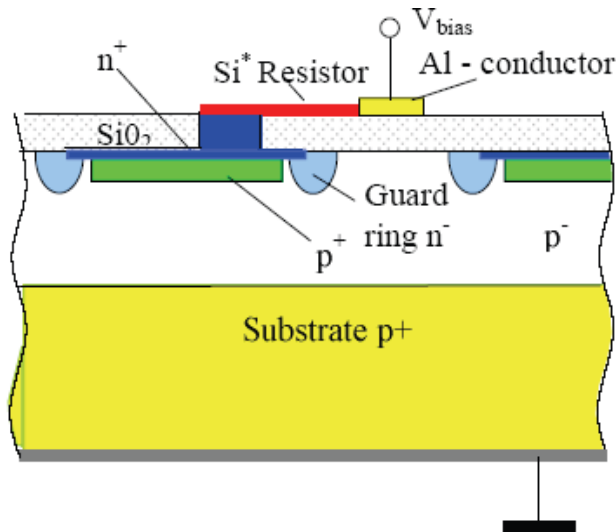


Generated carriers produce new electron-hole pairs while being accelerated by high electric field. **Ionization**

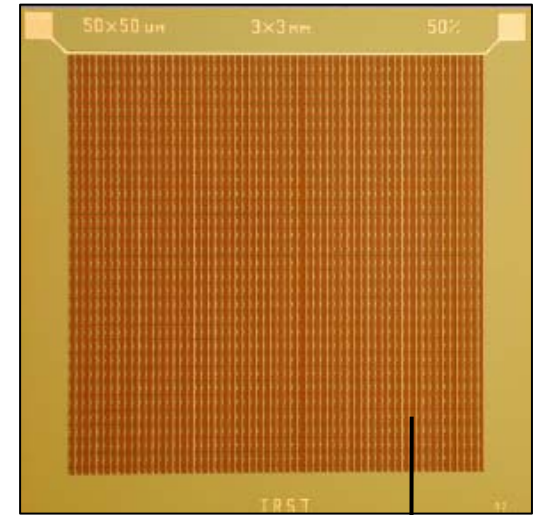


Newly generated carriers are also accelerated to produce further electron-hole pairs, and this process repeats itself. **Avalanche multiplication**

Gain proportional to the applied reverse bias voltage can be obtained.



3x3 mm²



3600 cellules

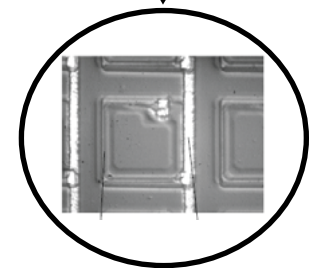
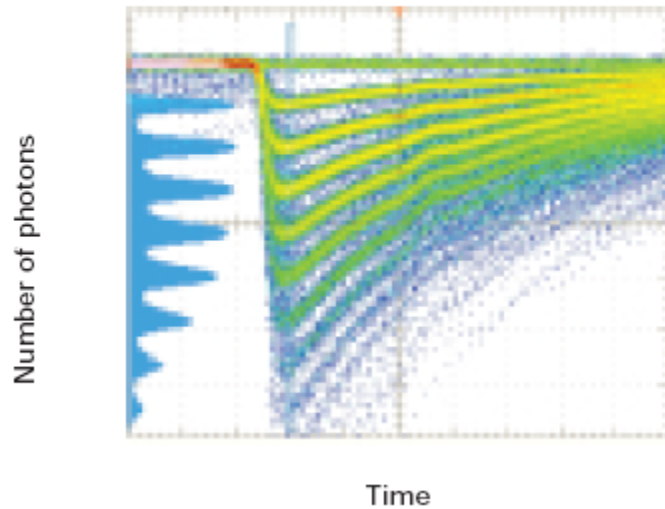


Photo- détecteurs

Semi-conducteurs

SiPM

- Pulse waveform when using an amplifier (120 times)
(S10362-11-050U, $M=7.5 \times 10^5$)



- Pulse height spectrum when using charge amplifier
(S10362-11-025U, $M=2.75 \times 10^5$)

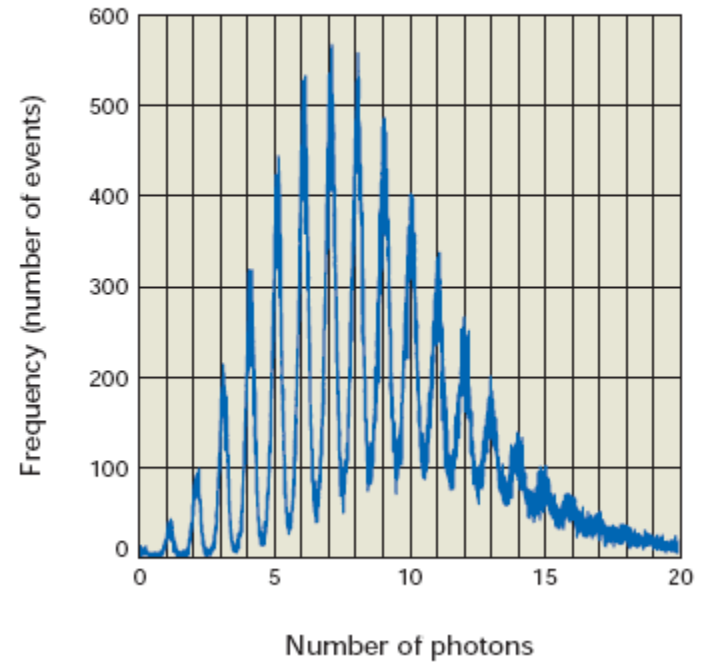


Photo- détecteurs

Semi-conducteurs

SiPM

■ Active area 1 × 1 mm type (Typ. unless otherwise noted, Ta=25 °C)

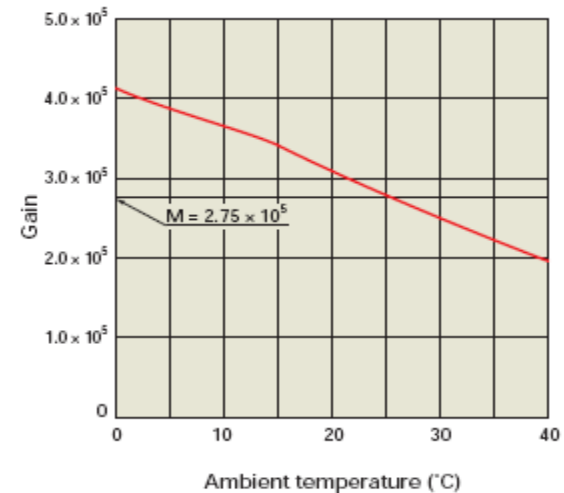
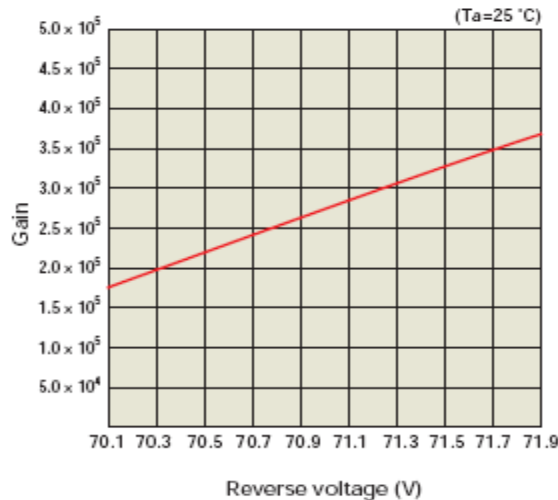


S10362-11-025U
/-050U/-100U



S10362-11-025C
/-050C/-100C

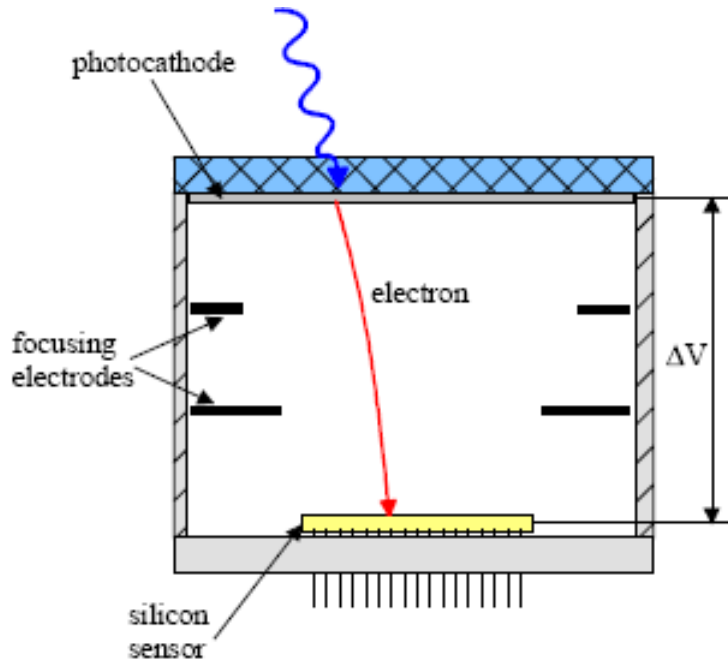
Parameter	Symbol	S10362-11 series			Unit
		-025U, -025C	-050U, -050C	-100U, -100C	
Chip size	-	1.5 × 1.5			mm
Effective active area	-	1 × 1			mm
Number of pixels	-	1600	400	100	-
Pixel size	-	25 × 25	50 × 50	100 × 100	µm
Fill factor *1	-	30.8	61.5	78.5	%
Spectral response range	λ	270 to 900			nm
Peak sensitivity wavelength	λp	400			nm
Quantum efficiency (λ=λp)	QE	70 Min.			%
Photon detection efficiency *2 (λ=λp)	PDE	25	50	65	%
Recommended operating voltage range	-	70 ± 10 *3			V
Dark count	-	300	400	600	kcps
Dark count Max.	-	600	800	1000	kcps
Terminal capacitance	Ct	35			pF
Time resolution (FWHM)	-	200 to 300			ps
Temperature coefficient of reverse voltage	-	50			mV/°C
Gain	M	2.75 × 10 ⁵	7.5 × 10 ⁵	2.4 × 10 ⁶	-



Bruit de fond : plusieurs centaines de KHz par mm²

Photo- détecteurs

Hybrid Photo Diode (HPD)



Single photon detection
with high resolution

Poisson statistics
with $\bar{n} = 5000$!

Background from
electron backscattering
from silicon surface

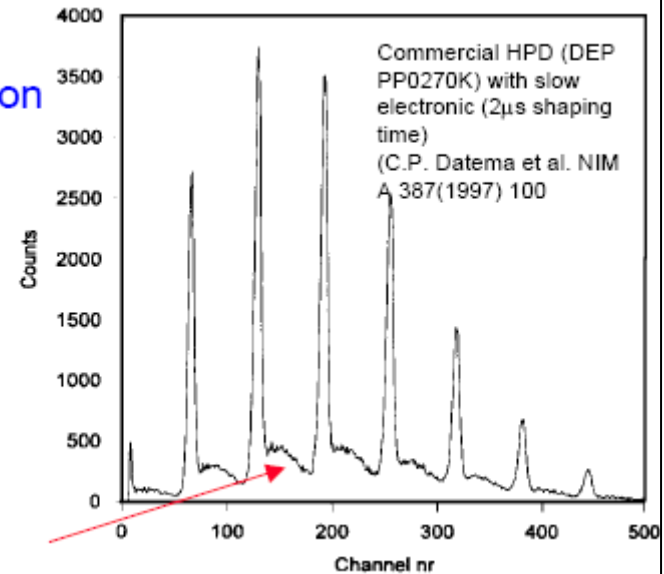


Photo cathode like in PMT, ΔV 10-20 kV

$$G = \frac{e\Delta V}{W_{Si}} = \frac{20 \text{ keV}}{3.6 \text{ eV}} \approx 5 \cdot 10^3 \quad (\text{for } \Delta V = 20 \text{ kV})$$

Photo Détecteurs gazeux

RICH

PM avec des GEM ...

Bibliographie (1)

Sources

- 1) Livres
- 2) Chapitres de livres. Articles et documents de revue
- 3) Cours de différents organismes (CERN, Berkeley, EJC)

- 4) Articles spécifiques
- 5) Documents de collaborations. Rapports internes.
Thèses

Livres

Les deux plus "célèbres"

G. F. Knoll, Radiation Detection et Measurement,
John Wiley (1989) (Première édition 1979, dernière édition 2000)

W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments,
Springer-Verlag, (1994) (Première édition 1987)

... il en existe d'autres...

Bibliographie (2)

Livres généraux (suite)

C. F.N. Tsoufanidis, Measurements and Detection of Radiation, Taylor & Francis, (1995) (Première édition 1983)

K. Kleinknecht, Detectors for particle radiation, Cambridge University Press, 1998
(Première édition : en allemand 1985, en anglais 1986)

C. Grupen, Particle Detectors, Cambridge University Press, 1996

C. F. G. Delaney and E. C. Finch, Radiation Detectors, Oxford University Press, 1992

R. C. Fernow, Introduction to experimental particle physics, Cambridge University Press, 1986

Bibliographie (3)

Livres « spécialisés »

G. Lutz, Semiconductor Radiation Detectors,
Springer 1999

W. Blum and L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers,
Springer-Verlag, 1993

Experimental Techniques in High-Energy Nuclear and Particle Physics,
(ed ; T. Ferbel), World Scientific, 1991 (Première édition 1987)

Experimental Techniques in Nuclear Physics,
(ed. N. Poenaru et W. Greiner), Walter de Gruyter, 1997

Instrumentation in High Energy Physics
(ed. F. Sauli), World Scientific, 1992

Bibliographie (4)

Ne pas oublier...

Instrumentation en Physique Nucléaire et en Physique des Particules,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 1988.

Physique nucléaire instrumentale : des éléments pour un bon choix,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 1994.

Physique nucléaire instrumentale : de la mesure à la grandeur physique,
Ecole Joliot-Curie de Physique Nucléaire 2001.

Ou encore

Particle Physics Booklet, July 2006
(édité par le Particle Data Group)

Consulter le site <http://pdg.lbl.gov/>

Sur les détecteurs <http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/pardetrpp.pdf>

Bibliographie (5)

Cours sur le WEB (parfois des transparents)

Particle Detector BriefBook.
(R.K. Bock et A.Valiescu)

<http://physics.web.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook>

Summer Student Lectures du CERN

<http://cdsweb.cern.ch/collection/Summer%20Student%20Lectures?ln=fr&as=1>

(En particulier, les cours de C.Joram en 2002)

Cours de détecteurs du SLAC (USA) en 1998

<http://www-group.slac.stanford.edu/sluc/lectures/Detector-Lectures.html>

"Tutorials" de Conférences, comme celle de NDIP08 (en CD)

Et les revues spécialisées

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research

I.E.E.E. Transactions on Nuclear Science