

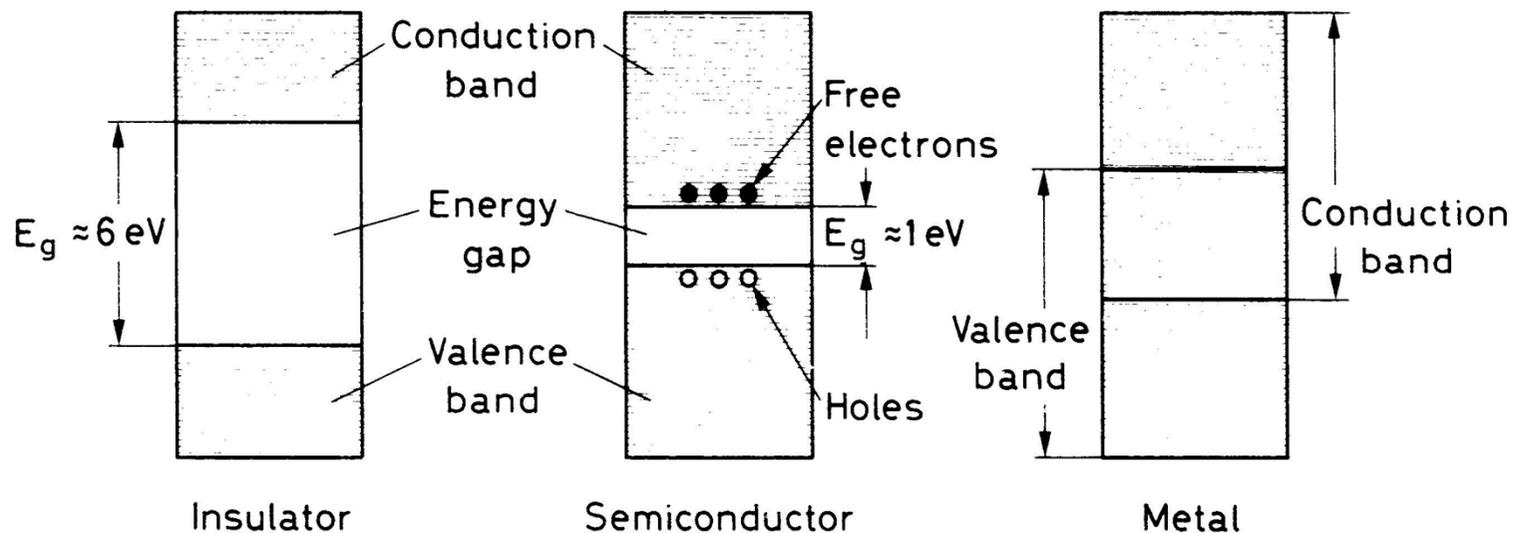
# Détecteurs Semi-conducteurs

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

# Bandes en énergie dans un solide

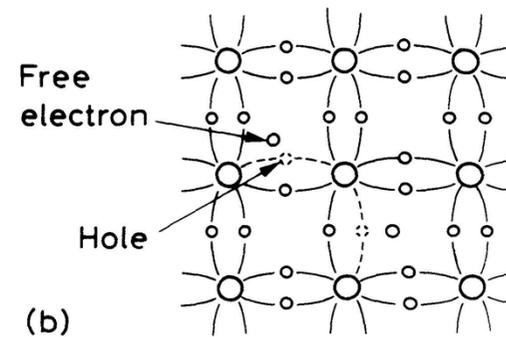
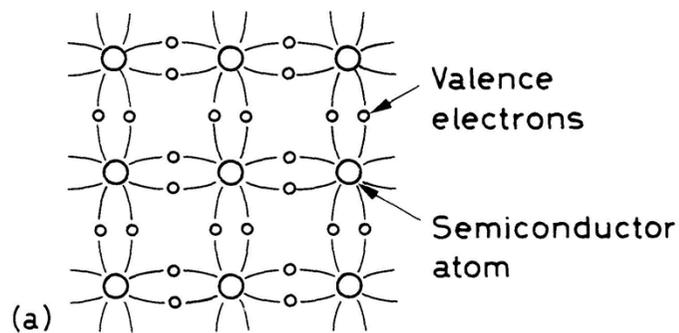
Les électrons se répartissent dans des bandes en énergie selon la Loi de Fermi

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



# Liaisons électroniques dans un semi-conducteur

- Atomes tétravalents: le Germanium et le Silicium



$10^{22}$  at/cm<sup>3</sup>

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

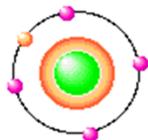
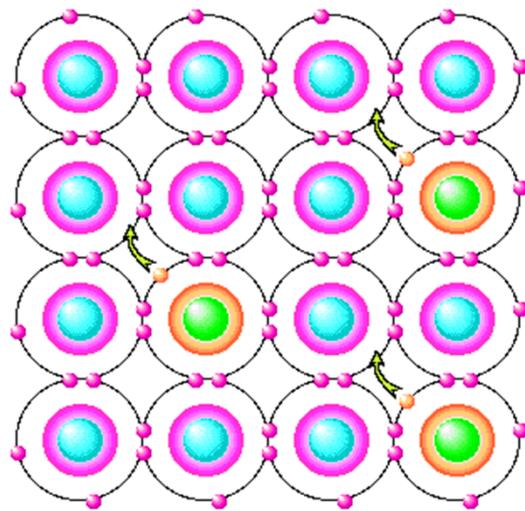
$$\begin{cases} n &= N_c \exp \frac{\epsilon_F - \epsilon_c}{kT} \\ p &= N_v \exp \frac{\epsilon_v - \epsilon_F}{kT} \end{cases}$$

$$n_i^2 \equiv np = N_c N_v \exp \frac{-E_g}{kT}$$

$n_i = 10^{11}/\text{cm}^3$  à 300 K

# Dopage d'un semi-conducteur

*Semi conducteur  
de type N*

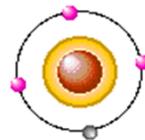
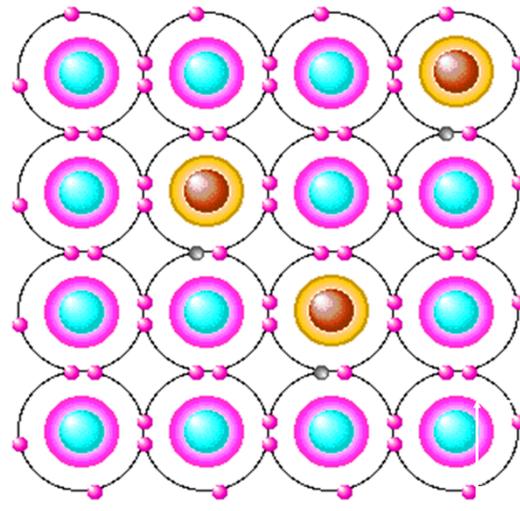


Atome donneur  
(phosphore, arsenic, antimoine...)



électron libre

*Semi conducteur  
de type P*



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



Trou

## Dopage

$10^{13}$  a  $10^{16}$

pour

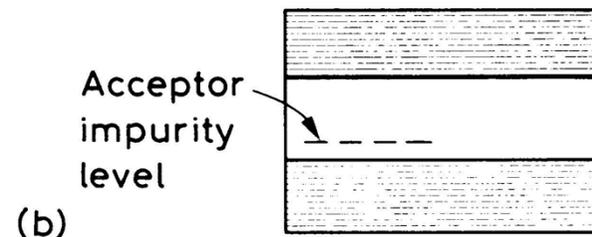
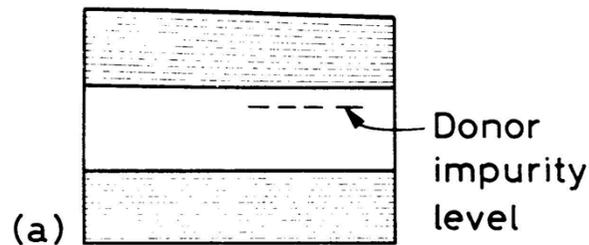
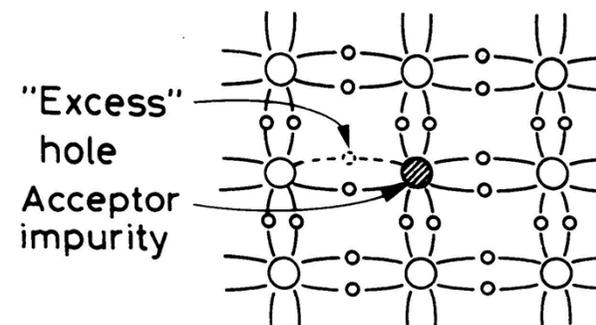
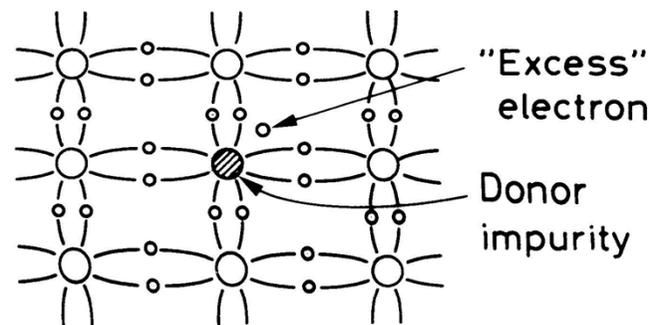
$10^{22}$  at /  $\text{cm}^3$

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

# Niveaux d'énergie dans un semi-conducteur dopé

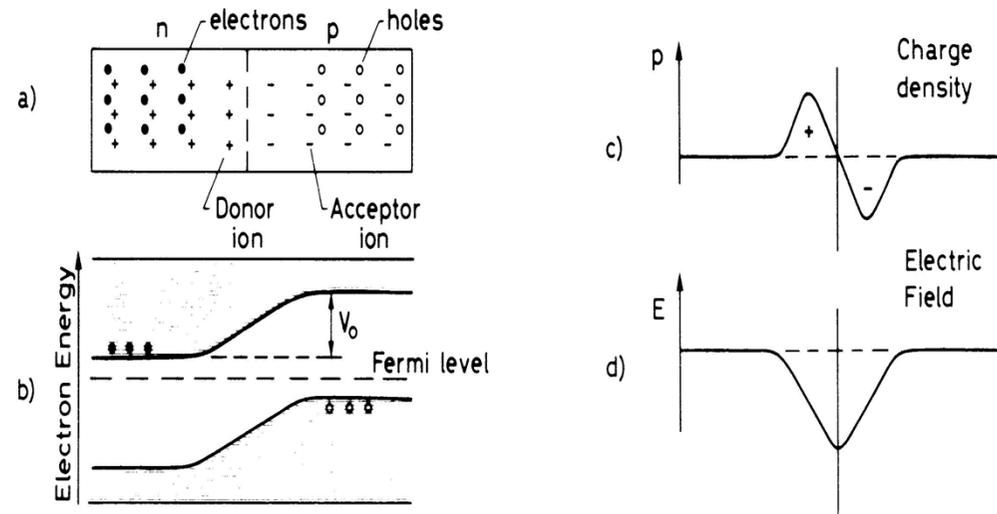
Les atomes donneurs créent un niveau dans le Gap légèrement sous le bas de la bande de conduction : résultat l'électron du donneur est excité dans la bande de conduction

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:

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

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

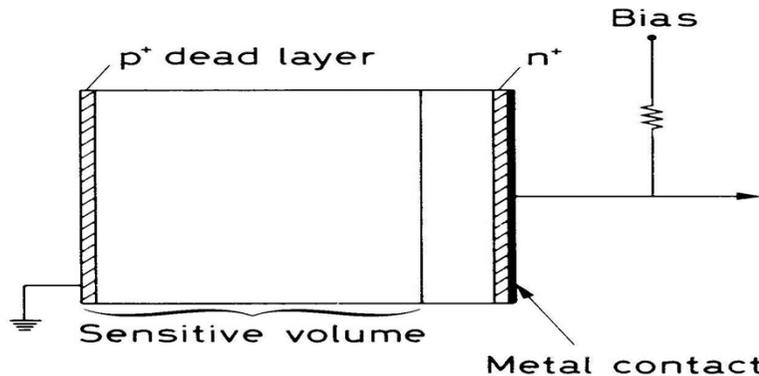
$$\begin{cases} x_N = \frac{2\epsilon V_d}{eN_D(1 + N_D/N_A)} \\ x_P = \frac{2\epsilon}{eN_A(1 + N_A/N_D)} \end{cases}$$

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



# 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~~

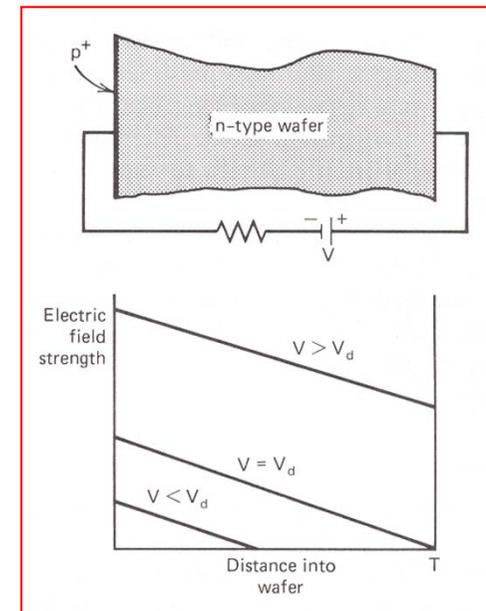
( Multiplication dans les photodétecteurs APD et SiPM )

## 4. Influence sur les électrodes

Création du signal

## 5. Electronique de lecture

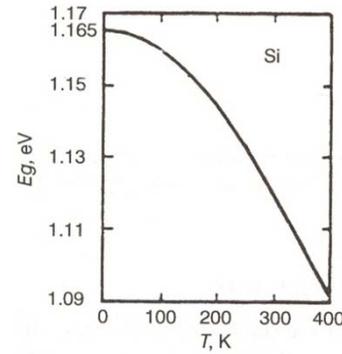
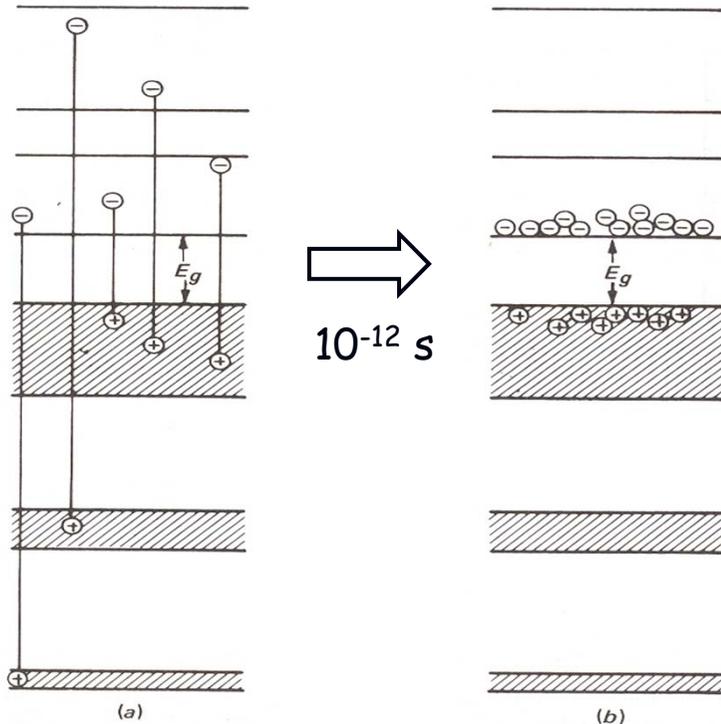
Traitement du signal



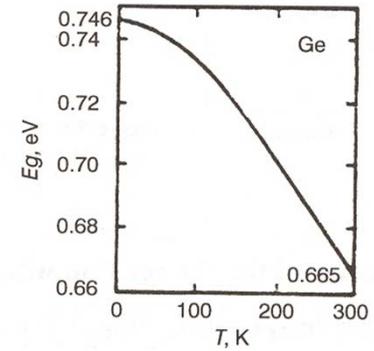
# Principales caractéristiques (1)

« Energy Gap »  
(séparation bande de valence et conduction)

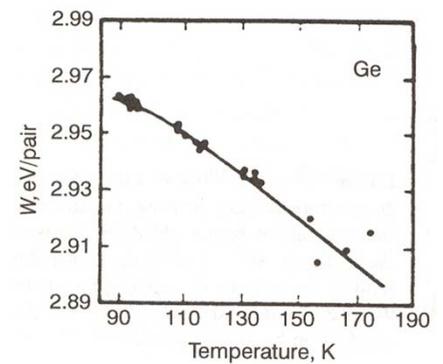
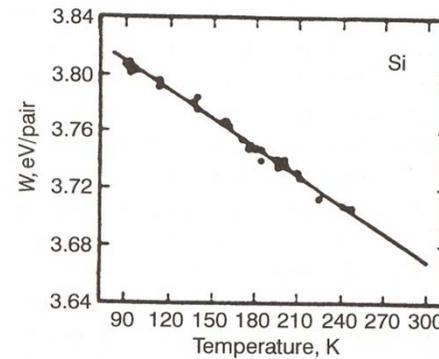
« Energy to produce a pair e/h »



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 <sup>3</sup>	2.33	5.32
Atoms/cm <sup>3</sup>	$4.96 \times 10^{22}$	$4.41 \times 10^{22}$
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 <sup>-3</sup>	$1.5 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$
Intrinsic resistivity (300 K); $\Omega \cdot \text{cm}$	$2.3 \times 10^5$	47
Electron mobility (300 K); cm <sup>2</sup> /V · s	1350	3900
Hole mobility (300 K); cm <sup>2</sup> /V · s	480	1900
Electron mobility (77 K); cm <sup>2</sup> /V · s	$2.1 \times 10^4$	$3.6 \times 10^4$
Hole mobility (77 K); cm <sup>2</sup> /V · s	$1.1 \times 10^4$	$4.2 \times 10^4$
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 } (Ref. 12)	< 0.11 (Ref. 11)
	to 0.137 }	0.057 } (Ref. 12)
	0.16 (Ref. 13)	0.064 } (Ref. 12)
		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

# Utilisation en physique de hautes énergies

## Mesure de la position

Détecteurs de « Vertex » ou de « Traces »

Silicium de 300  $\mu\text{m}$

Particule au Minimum d'ionisation (mip) :

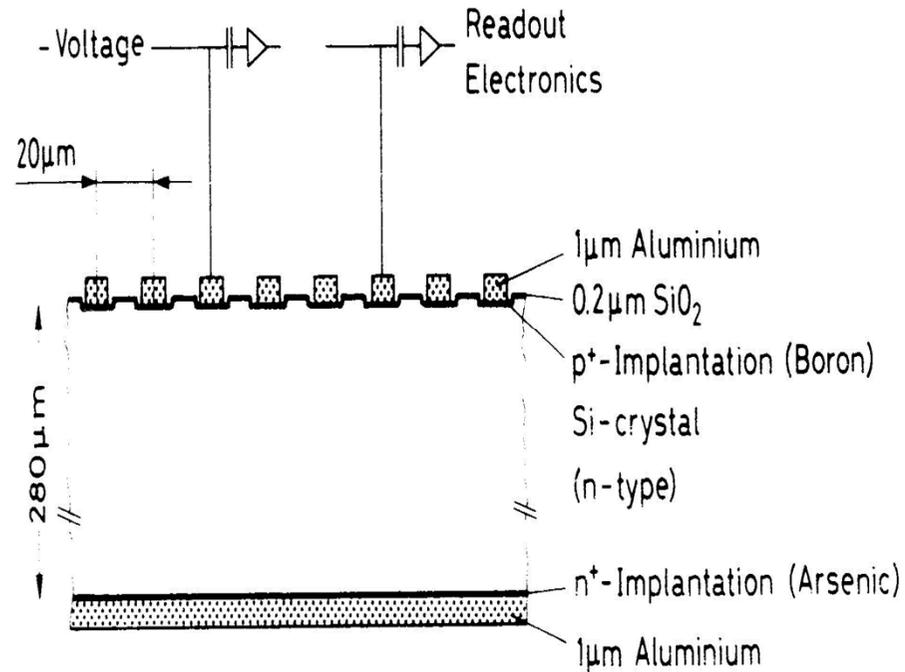
Dans une zone déplétée de 300  $\mu\text{m}$ , un mip dépose une énergie :  
$$E = 0.03\text{cm} \times (1.6 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)) \times (2.33\text{g}/\text{cm}^3) = 100 \text{ KeV}$$

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

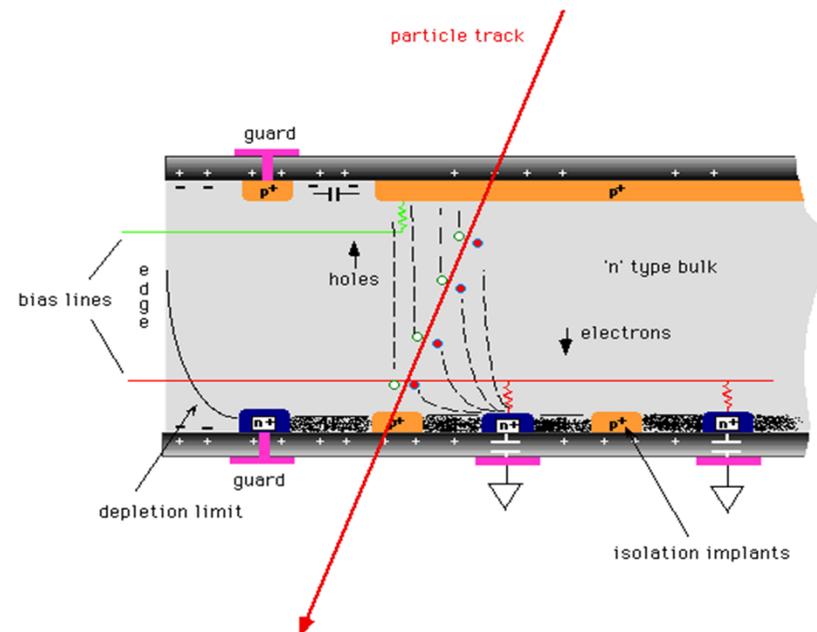
$$100 \text{ KeV} / 3.6 \text{ eV} = 25000 \text{ paires.}$$

(80 paires par micron pour un mip)

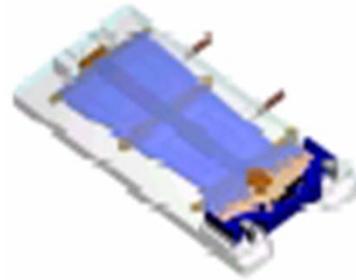
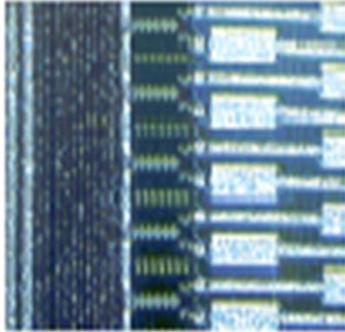
# Les détecteurs microstrips



## Détecteur de Vertex Atlas



# Détecteur au Silicium dans Atlas



STC d'ATLAS

Plaquette 6cm x 6 cm

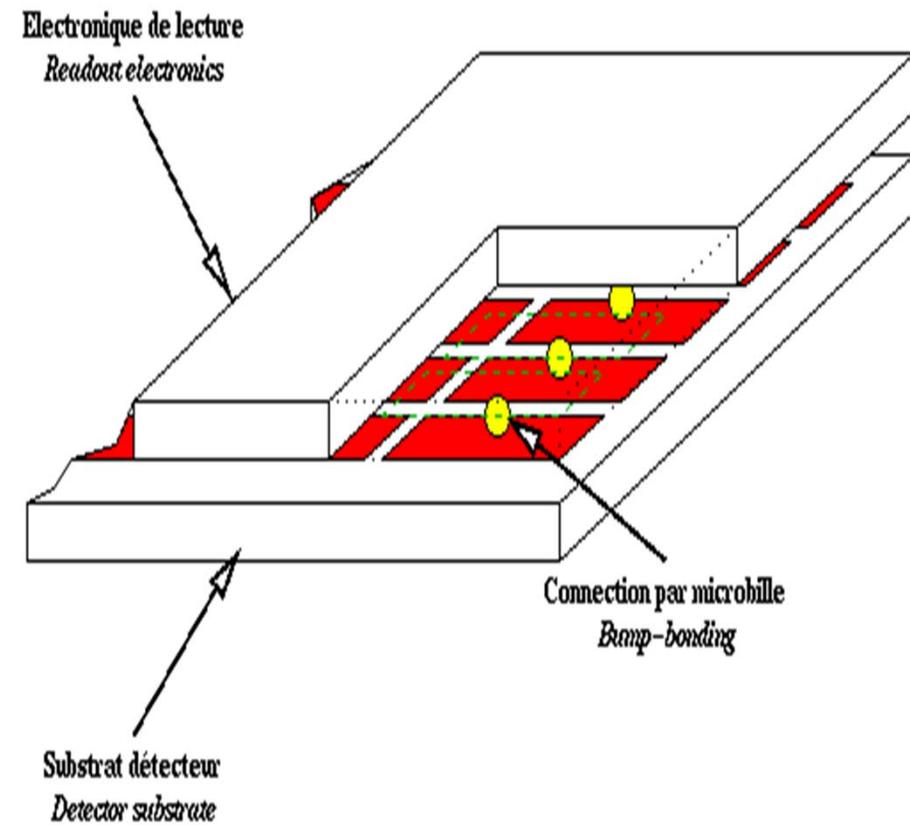
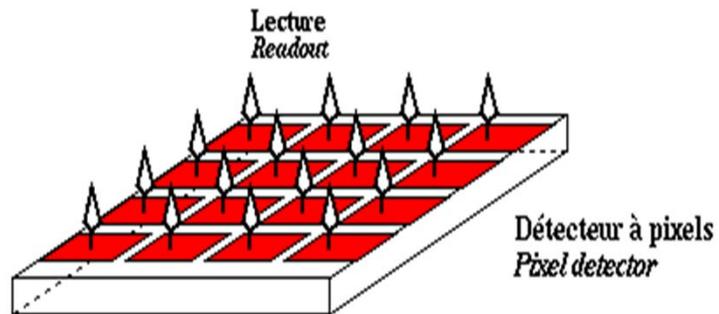
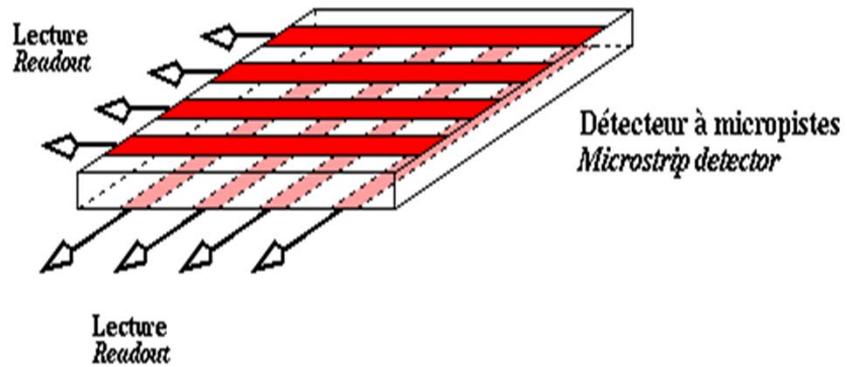
768 micropistes de 20  $\mu\text{m}$  de large

Lecture tous les 80  $\mu\text{m}$

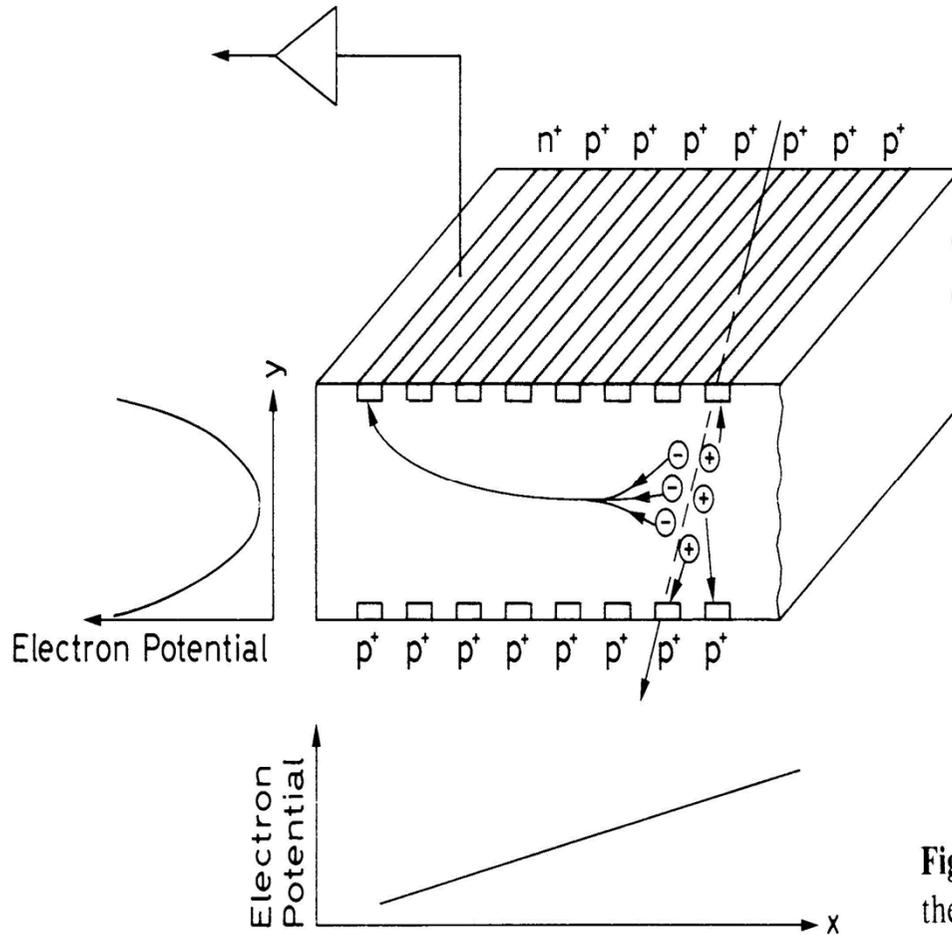
Épaisseur 300  $\mu\text{m}$



# 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  $\mu$ s.

Fig. 10.  
the silic

# Détecteurs au Silicium

## Utilisation en physique nucléaire

Mesures d'énergie  
(Grande dynamique)

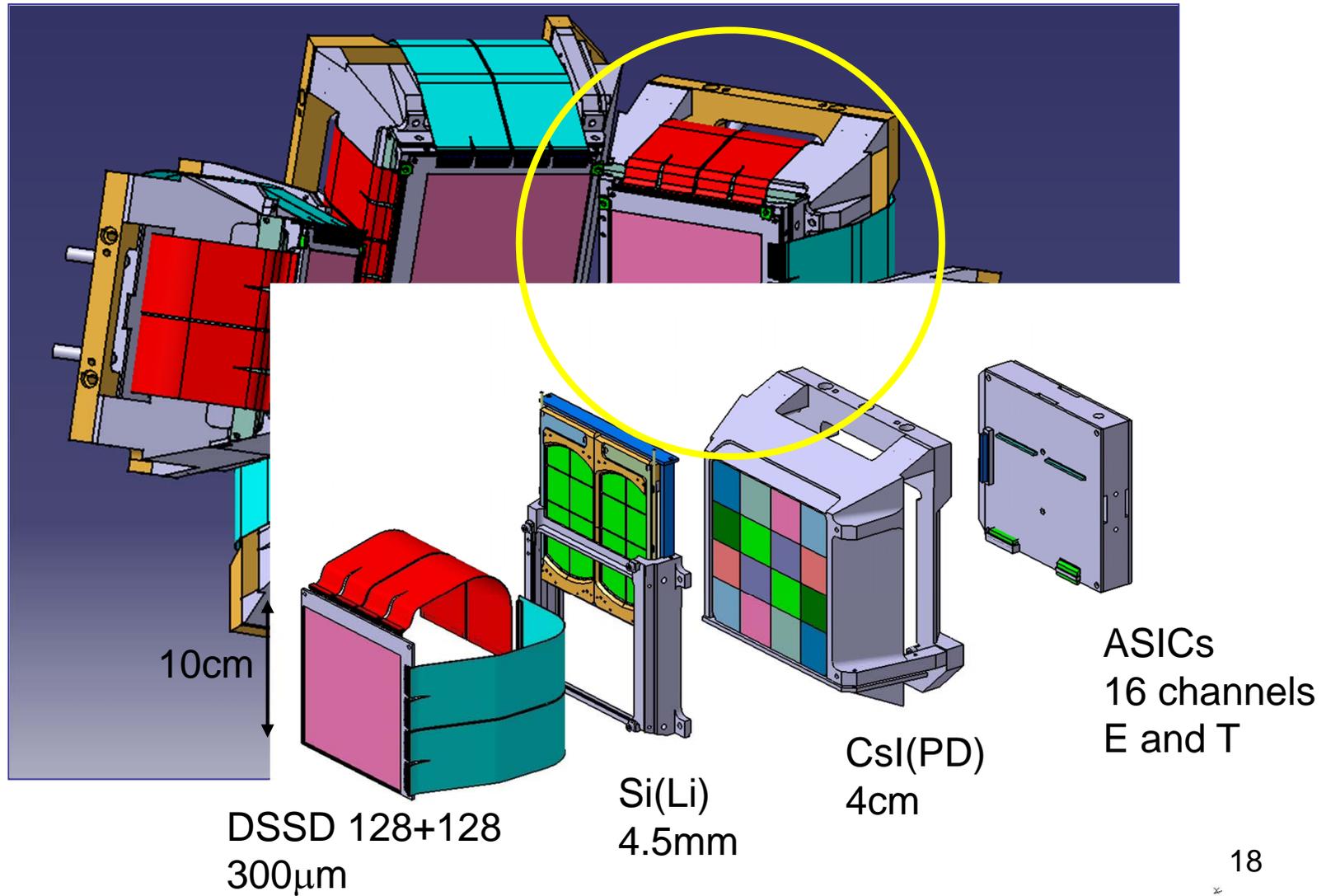
Mesures de temps

Mesures de position  
(Segmentation en pistes)

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

# The MUST2 Array

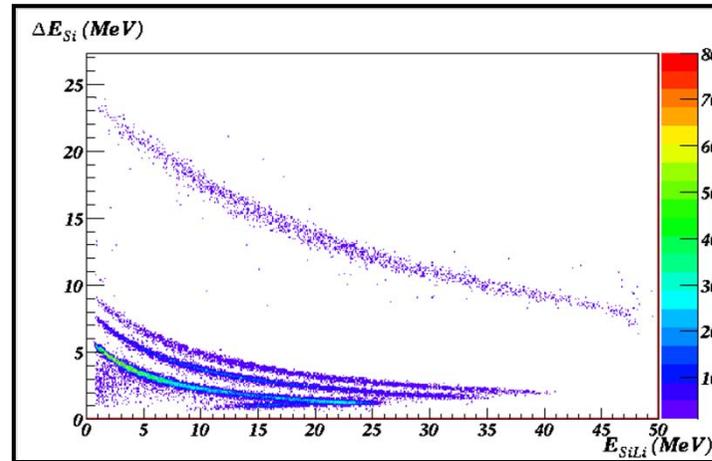
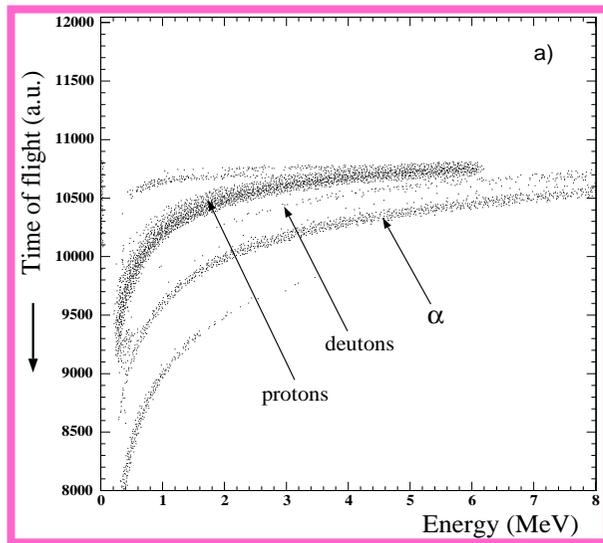
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL



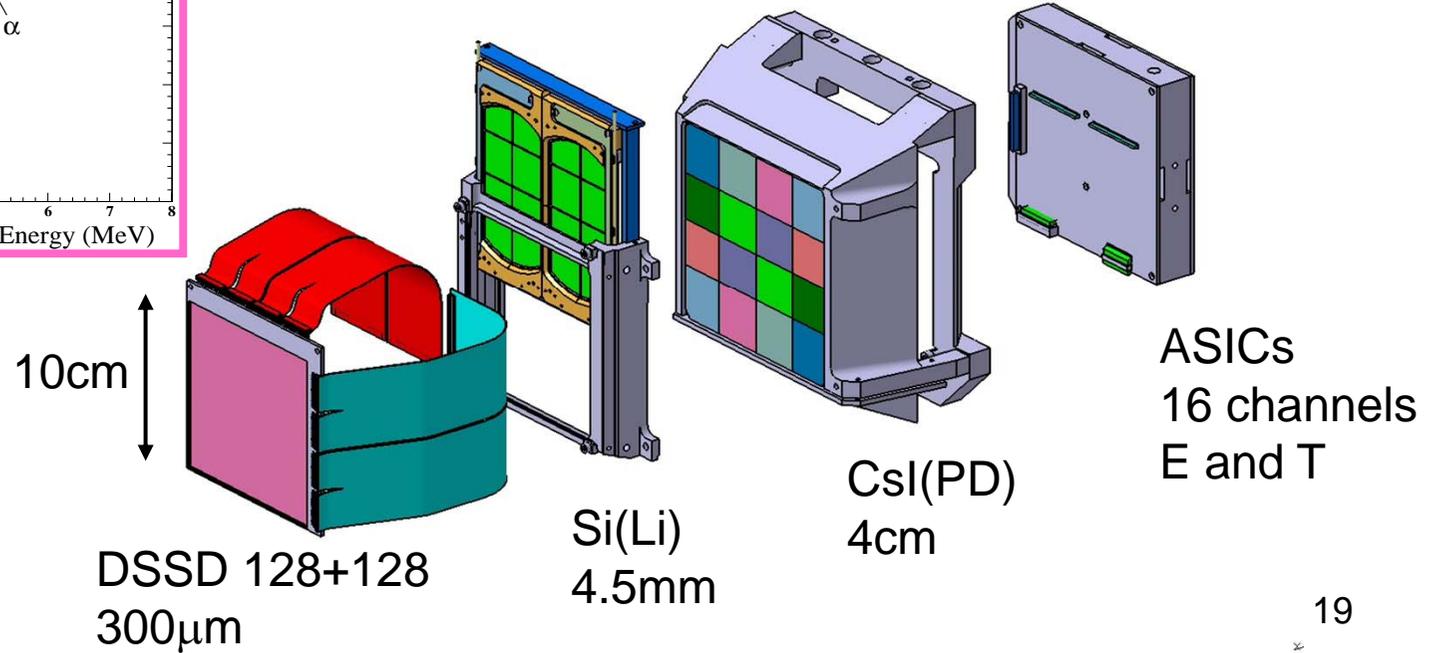
# The MUST2 Array

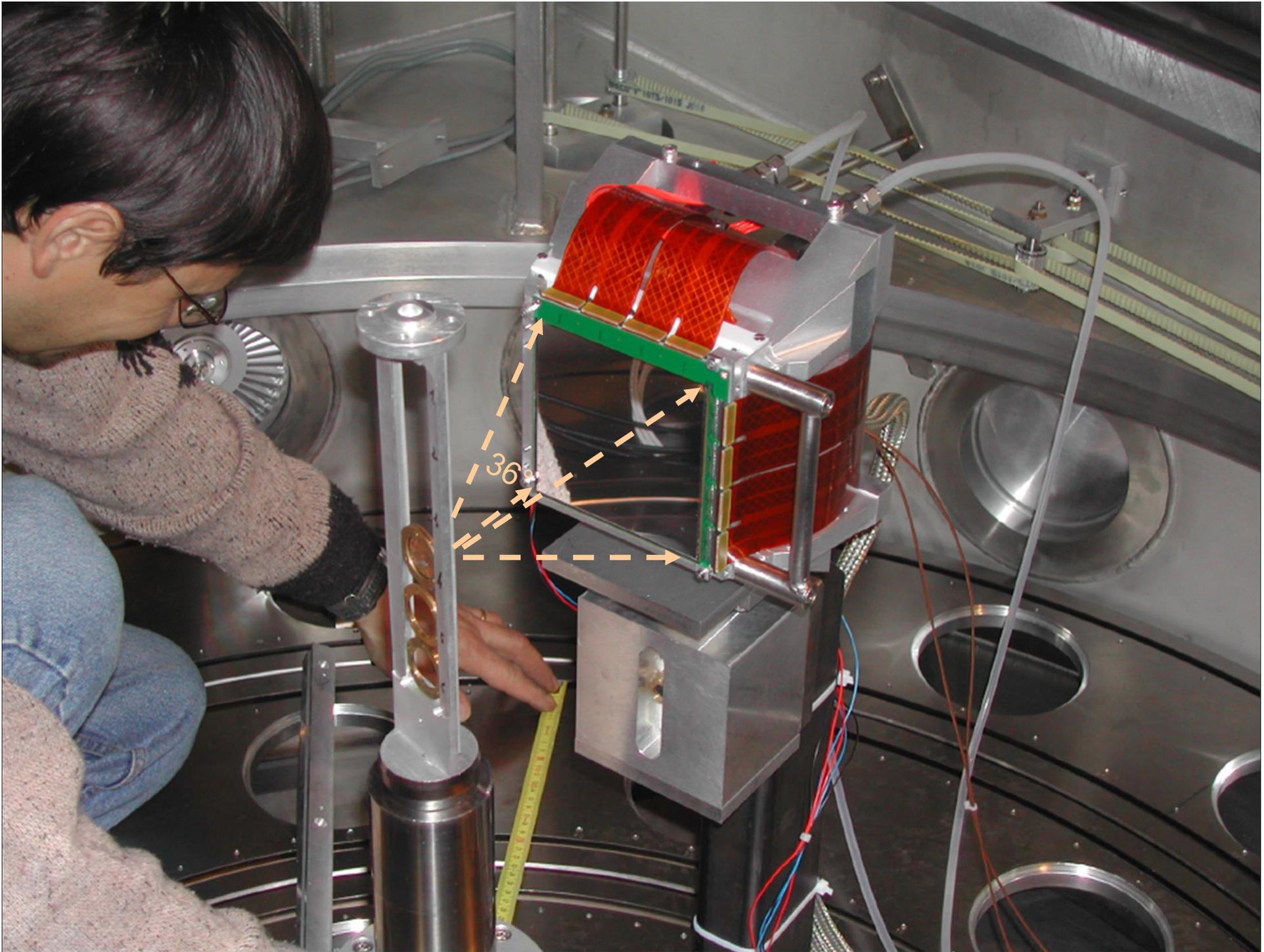
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL

Temps de Vol  
Energie



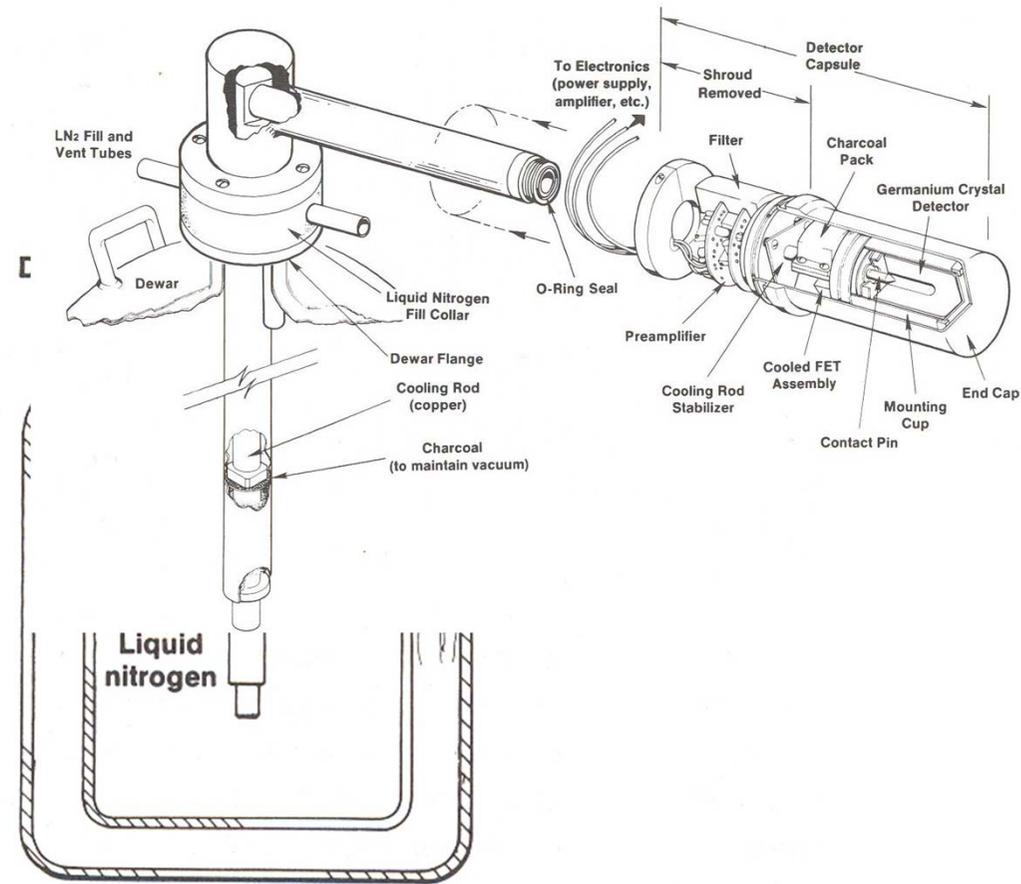
Perte d'énergie  
Energie





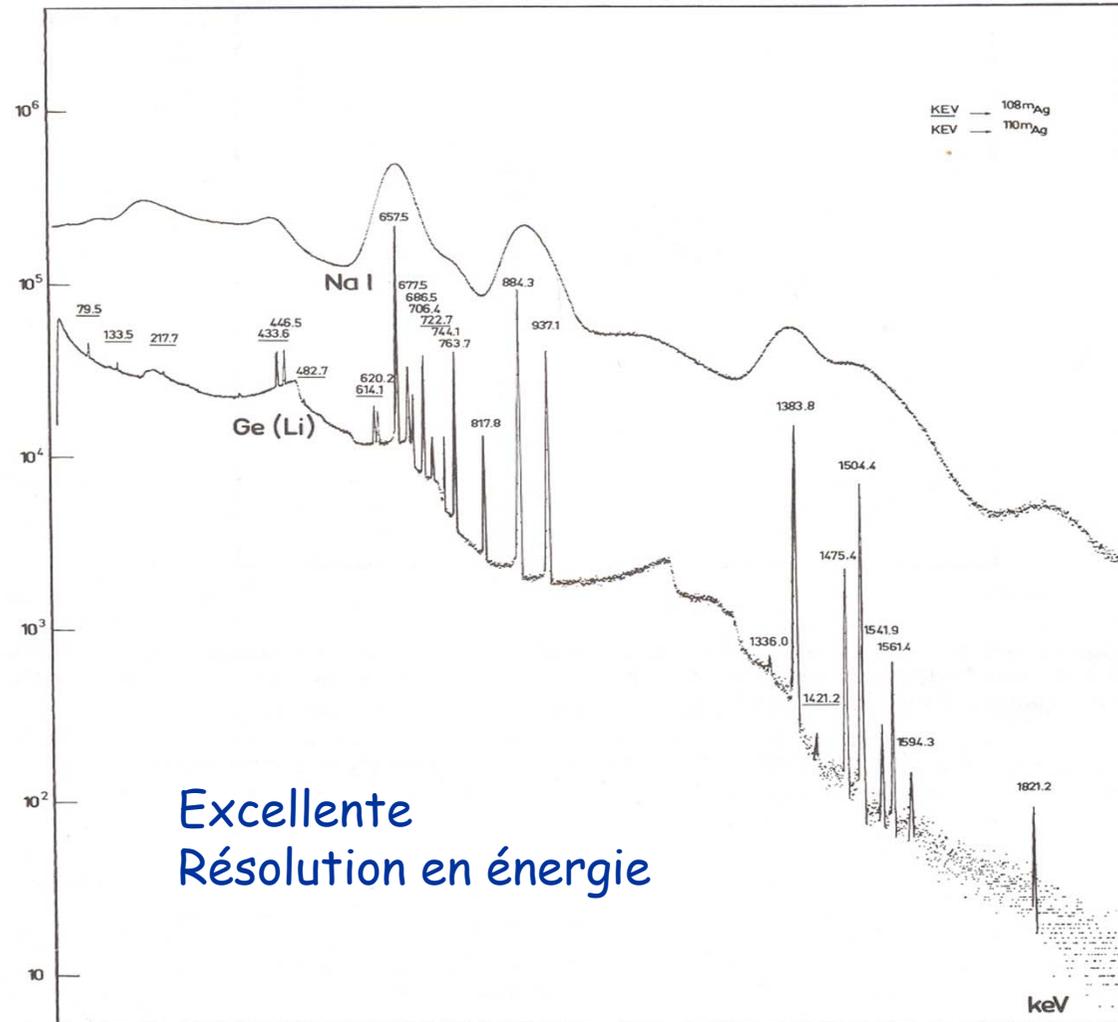
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons



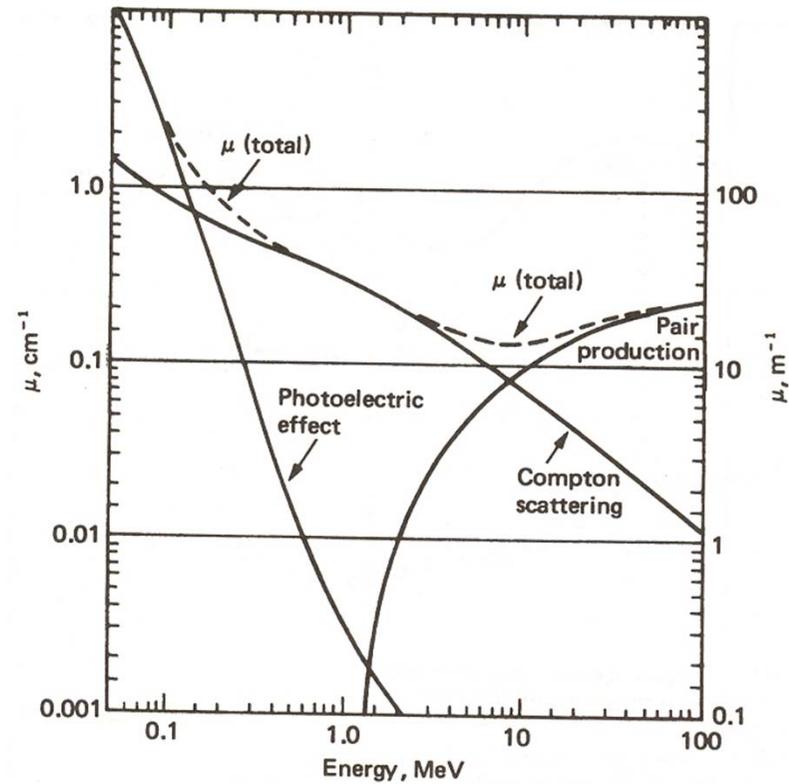
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons



# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

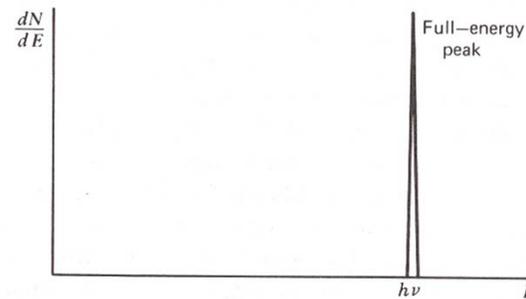
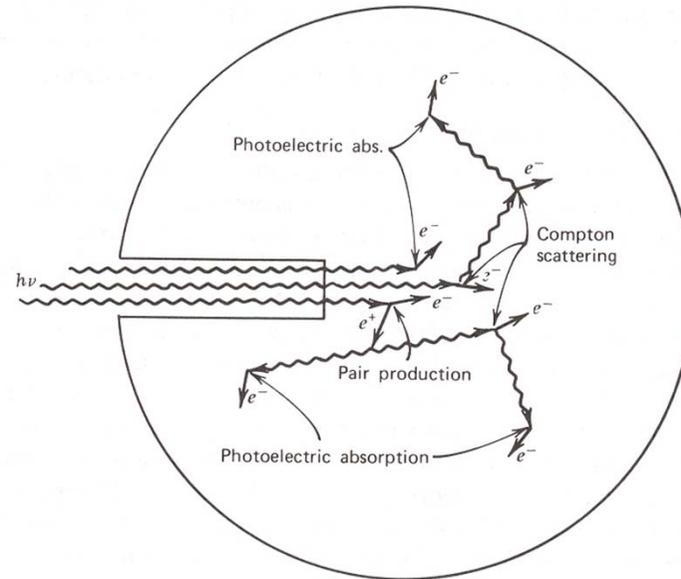


Coefficients d'atténuation dans le Germanium

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

Détecteur  
de grand volume

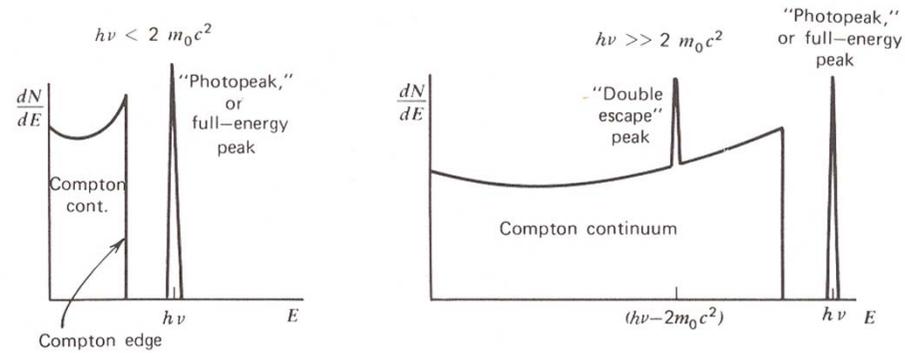
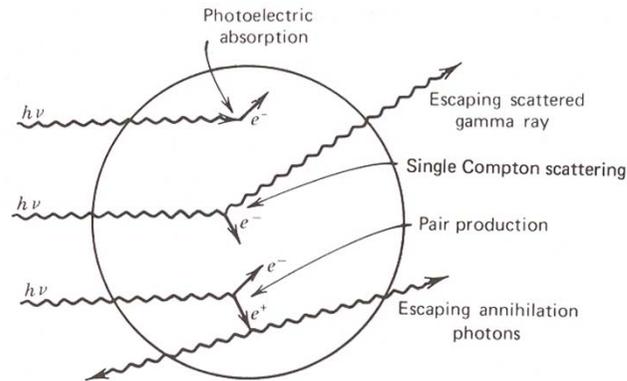


Extrait du livre de Knoll

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

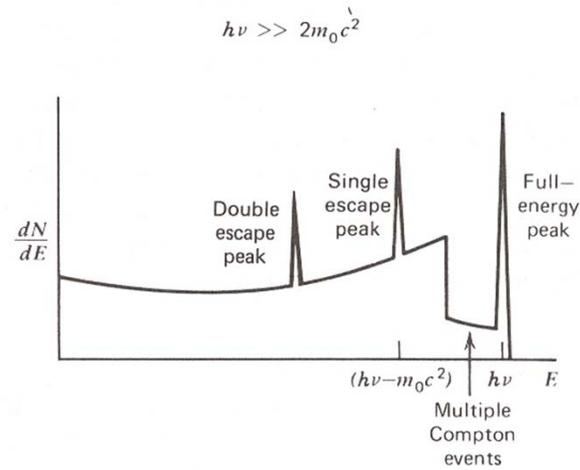
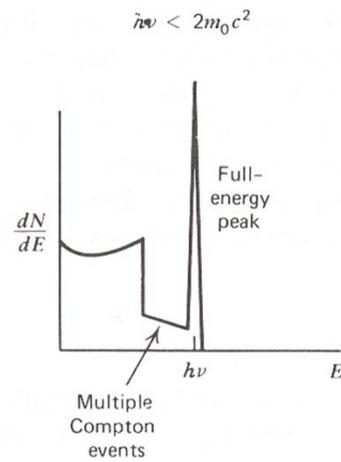
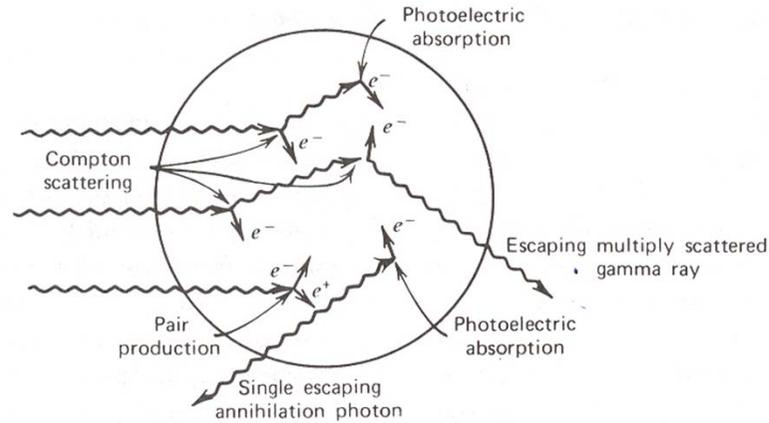
Détecteur  
de petit volume



# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

Détecteur de « volume moyen »

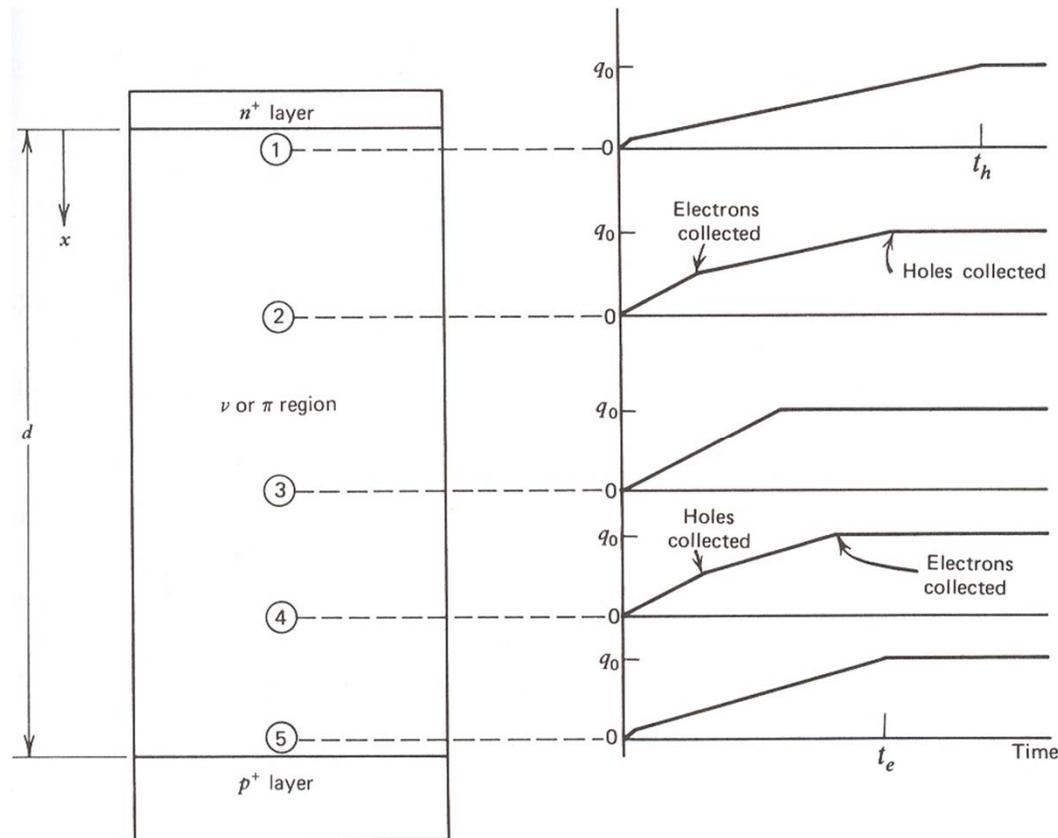


Extrait du livre de Knoll

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

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



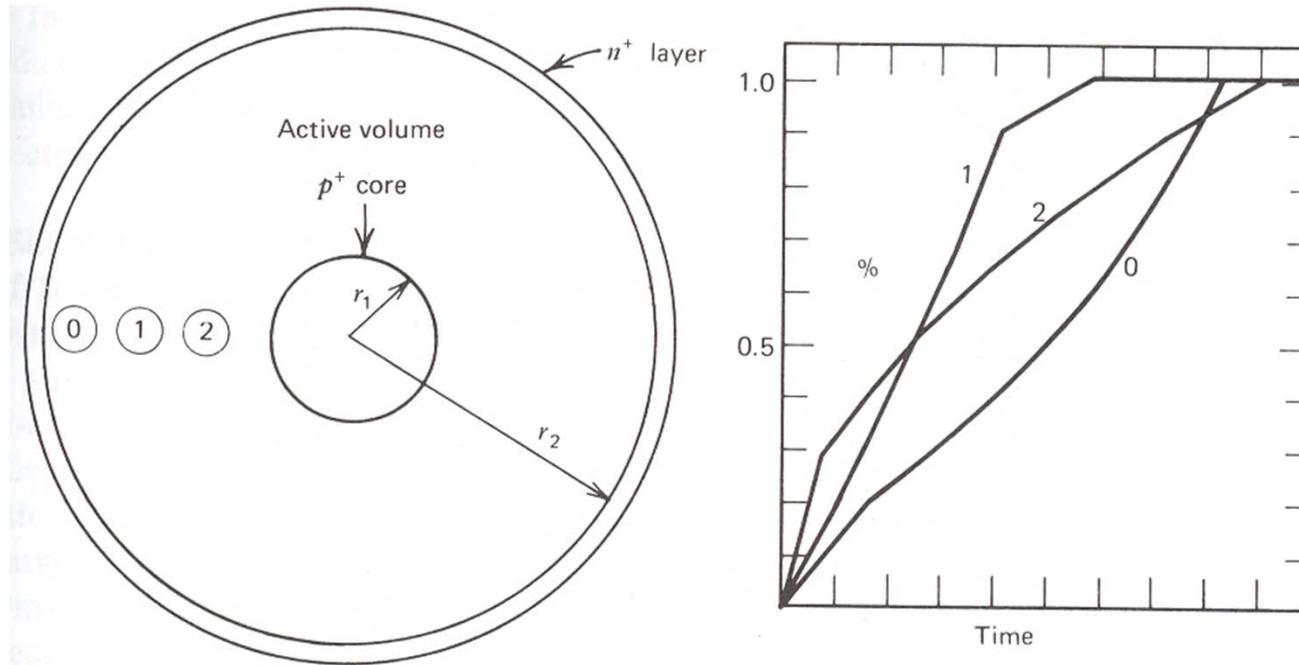
Détecteur planaire

Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

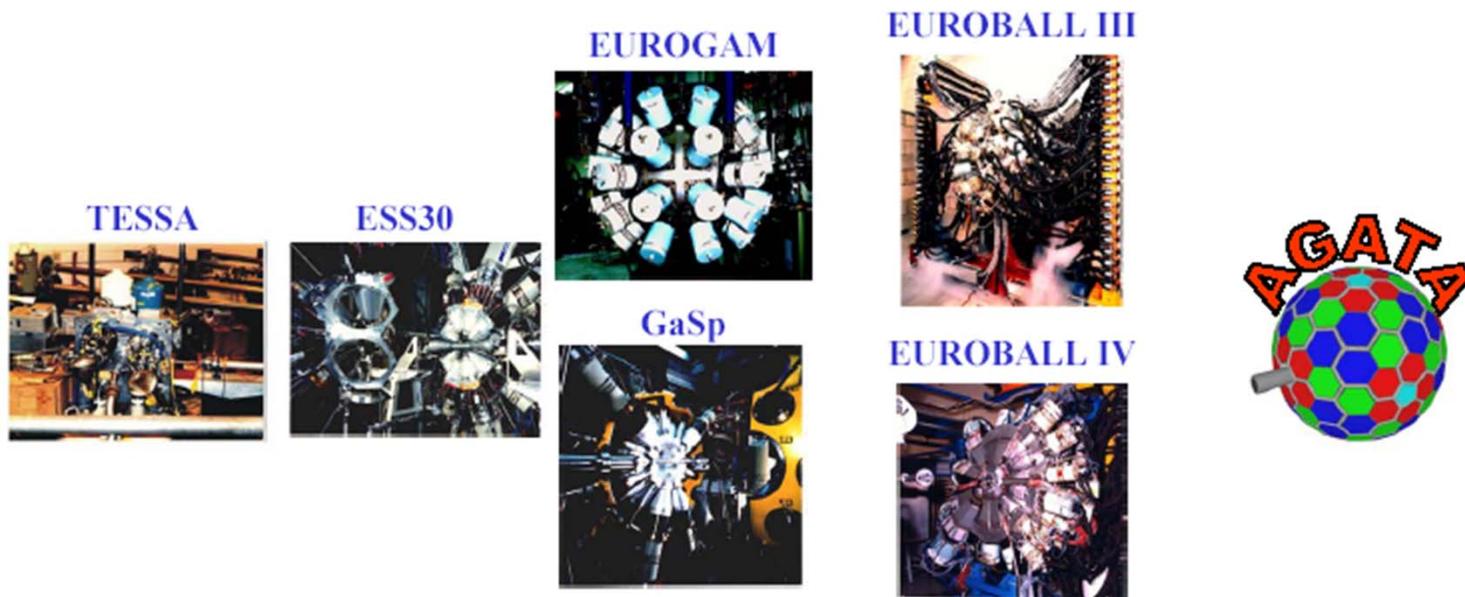
Forme d'impulsion (en charge) pour différents points d'interaction



Détecteur coaxial

Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

# Arrays from TESSA0 to AGATA



John Simpson , Nuclear Physics Group



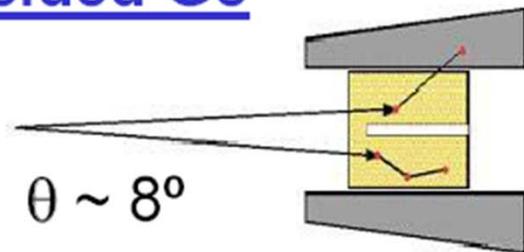
# Idea of $\gamma$ -ray tracking

## Compton Shielded Ge

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

$N_{\text{det}} \sim 100$

$\Omega \sim 40\%$

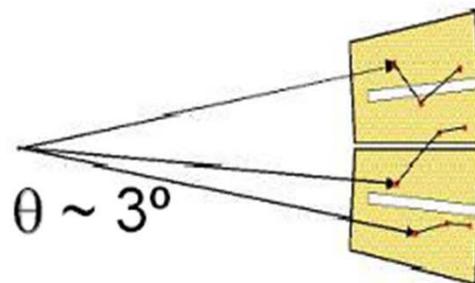


large opening angle  
means poor energy  
resolution at high  
recoil velocity

## Ge Sphere

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

$N_{\text{det}} \sim 1000$



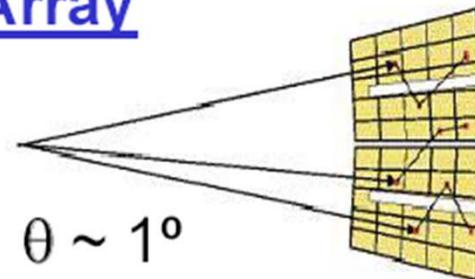
too many detectors  
are needed to avoid  
summing effects

## Ge Tracking Array

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

$N_{\text{det}} \sim 100$

$\Omega \sim 80\%$



### Combination of:

- segmented detectors
- digital electronics
- pulse processing
- tracking the  $\gamma$ -rays