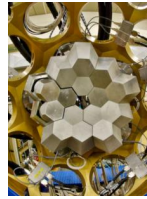
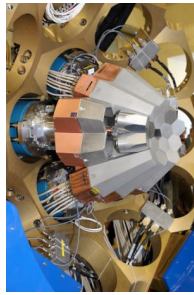


# Détecteurs à semi-conducteurs



Jean Peyré

CSNSM (Centre de Sciences Nucléaires et  
de Sciences de la Matière)  
CNRS-IN2P3-Université Paris Sud (Paris-Saclay)

91405 Orsay, France  
Tél. : +33 1 69 15 52 43  
Fax : +33 1 69 15 50 08  
<http://www.cnsnm.in2p3.fr>



Jean.Peyre@cnsnm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Détecteurs à semi-conducteurs

### Sommaire

*I - Caractéristiques de base des semi-conducteurs*

*II - Les semi-conducteurs dopés*

*III - La jonction PN*

*IV - Comment fonctionne un détecteur à semi-conducteurs ?*

*V - Caractéristiques des jonctions PN*

*VI - Détecteurs à diode silicium*

*VII - Détecteurs germanium*

*VII\_a - Les détecteurs "planaires"*

*VII\_b - Les détecteurs "coaxiaux"*

*VII\_c - "Anti-compton"*

*VII\_d - "Le projet AGATA"*

*VIII - autres matériaux*



Jean Peyré

P.2

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# I - Caractéristiques de base des semi-conducteurs

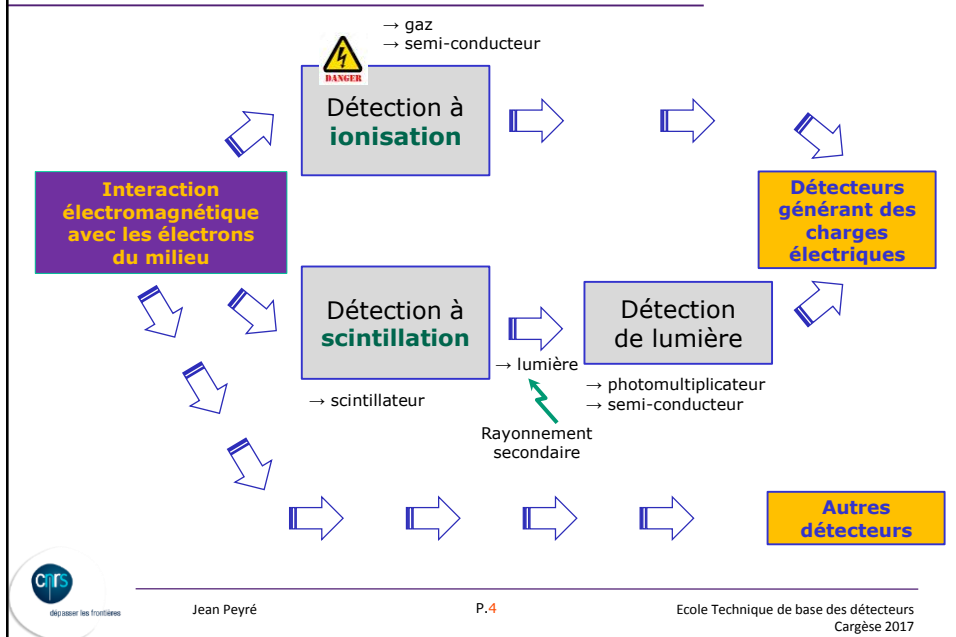


Jean Peyré

P.3

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Ionisation & scintillation



Jean Peyré

P.4

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

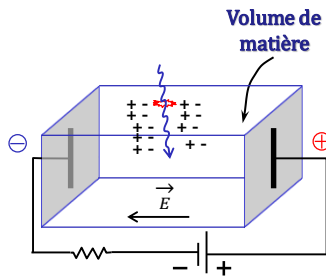
## Fonctionnement de la détection à ionisation



Détection à ionisation



Détecteurs générant des charges électriques



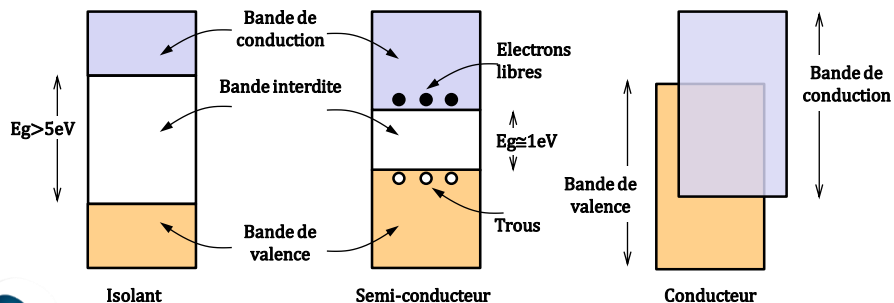
### Fonctionnement

- 1-Absorption du rayonnement
- 2-Conversion en charges par ionisation
- 3-Mouvement des charges grâce à la présence d'un champ électrique

## Les semi-conducteurs

### Energies possibles d'un électron dans un cristal

- Les semi-conducteurs sont des solides dont la structure est périodique et le réseau cristallin.
  - Atome isolé  $\Rightarrow$  niveaux d'énergie **quantifiés** pour les électrons
  - Cristal  $\Rightarrow$  "**bandes d'énergie permises**" pour les électrons sont séparées par des "**bandes interdites**"



## Les semi-conducteurs

### Etat probable occupé d'un électron dans un cristal à l'équilibre thermodynamique

La **conduction électrique** n'est possible que si il existe à l'intérieur d'une bande permise des niveaux vides à côté de niveaux occupés. Dans ce cas, les charges vont pouvoir se déplacer sous l'effet d'un champ électrique.

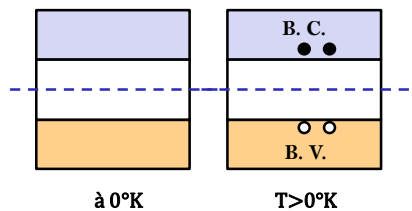
□ A **0°K**, la bande de valence des SC intrinsèque est pleine.

→ **pas de conduction possible**

□ A **Température > 0°K**

La bande de conduction vide n'étant séparée de la bande de valence pleine que par un intervalle relativement faible (de l'ordre de  $\approx 1$  eV), une excitation thermique suffit aux électrons pour atteindre la bande de conduction créant ainsi des trous dans la bande de valence

→ **conduction possible**



Jean Peyré

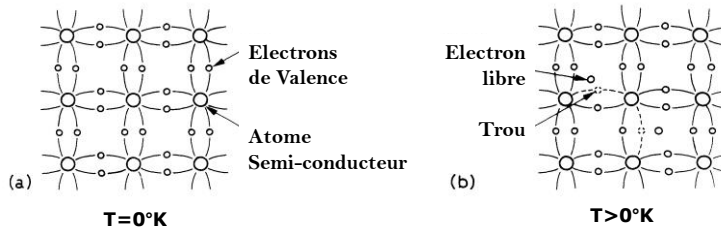
P.7

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### Liaisons électroniques & porteurs de charge

- Porteurs de charges: **électrons** de charge  $-q_e$  et les **trous** que l'on peut traiter comme des particules de charge  $+q_e$
- Atomes tétravalents: le **Germanium** et le **Silicium**



Nombre d'Avogadro:  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$   
 $M(\text{Si}) = 28,08 \text{ g/mol}$  ;  $\rho(\text{Si}) = 2,33 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$  densité d'atomes Si =  **$5 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$**   
 $M(\text{Ge}) = 72,64 \text{ g/mol}$  ;  $\rho(\text{Ge}) = 5,32 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow$  densité d'atomes Ge =  **$4,4 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$**

**Pour le Si et Ge  $\approx 5 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$**



Jean Peyré

P.8

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Liaisons électroniques & porteurs de charge

- A température > 0°K, formation de paires électron/trou par **excitation thermique**

$$n_i^2 = np = AT^3 e^{\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}$$

$n_i = n = p$  pour SC intrinsèque

	Ge	Si	unité
$E_g$ 300°K	0,67	1,11	eV
$E_g$ 77°K	0,74	1,16	eV

	Ge	Si	unité
concentration $n_i$ à 300°K	$\approx 2,4 \times 10^{13}$	$\approx 1,4 \times 10^{10}$	atomes/cm <sup>3</sup>
concentration $n_i$ à 273°K	$\approx 4,7 \times 10^{12}$	$\approx 1,3 \times 10^9$	atomes/cm <sup>3</sup>
concentration $n_i$ à 77°K	$\approx 3,2 \times 10^{-7}$	$\approx 2,3 \times 10^{-20}$	atomes/cm <sup>3</sup>

$k$ : cste de Boltzmann

$T$ : Température

$A$ : Constante caractéristique du matériau

$E_g$ : gap en énergie de la bande interdite

$n$ : concentration (nbre par unité de volume) en électrons de la bande de conduction

$p$ : concentration (nbre par unité de volume) en trous de la bande de valence

$n_i$ : concentration pour le matériau intrinsèque

à  $T=300^\circ\text{K}$ ,  $kT \approx 0,025\text{eV}$



## II - Les semi-conducteurs dopés



# Table périodique des éléments

En pratique il est difficile d'obtenir des matériaux purs. Il subsiste toujours des impuretés ( $10^9$  at/cm<sup>3</sup>). Par contre, il est facile de doper les cristaux avec des impuretés déterminées. On a alors des **semi-conducteurs extrinsèques**.



Jean Peyré

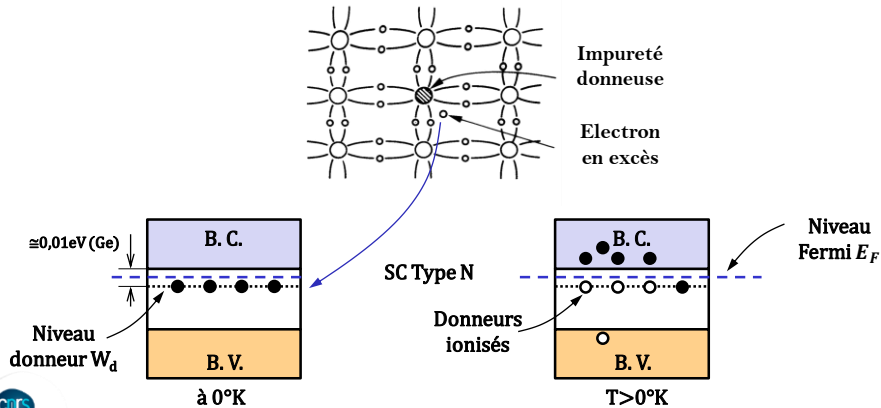
P.11

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Dopage de type N

- Les atomes **donneurs** créent un **niveau donneur ( $W_d$ )** dans la bande interdite très légèrement sous le bas de la bande de conduction (à environ 0,01 eV pour le Germanium):
  - **l'électron du donneur peut être excité facilement ( $T > 0^{\circ}K$ ) dans la bande de conduction**



Jean Peyré

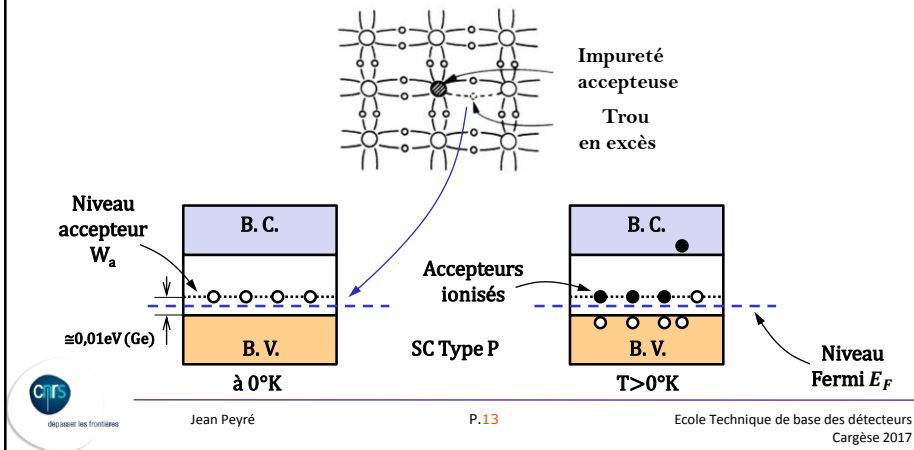
P.12

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Dopage de type P

- Les atomes **accepteurs** créent un **niveau accepteur ( $W_a$ )** dans la bande interdite légèrement au dessus de la bande de valence (à environ 0,01 eV pour le Germanium).
  - **Un électron de la bande de valence peut peupler ce niveau en laissant un trou dans la bande de valence ( $T > 0^\circ\text{K}$ ).**



# Les semi-conducteurs

## Porteurs de charge

- Dopage:  **$10^{13}$  a  $10^{16}$  at/cm<sup>3</sup>** pour  **$5 \times 10^{22}$  at /cm<sup>3</sup>**
- **Semi-conducteur de type N à 300°K:**
  - $n \cong N_D$ , n nombre d'électrons de conduction (porteurs majoritaires),  $N_D$  (at/cm<sup>3</sup>) nombre d'atomes donneurs
  - résistivité  $\rho \cong 1 / q_e \cdot N_D \cdot \mu_e$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- **Semi-conducteur de type P à 300°K :**
  - $p \cong N_A$ , p nombre de porteurs majoritaires,  $N_A$  (at/cm<sup>3</sup>) nombre d'atomes accepteurs
  - résistivité  $\rho \cong 1 / q_e \cdot N_A \cdot \mu_h$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- **Dans un semi-conducteur QUELCONQUE,  $n_i^2 = np$ ,  $n_i$  est une caractéristique du matériau intrinsèque.**

Rappel:  
excitation thermique intrinsèque  
Si:  $n_i = 1,4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  à 300°K

$$n_i^2 = np = AT^3 e^{\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}$$

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>2</sup>
largeur bande interdite $E_g$	~0,7	~1,1	eV
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	$\Omega \cdot \text{cm}$
Résistivité type N à 300°K		~500	$\Omega \cdot \text{cm}$

### III - La jonction PN



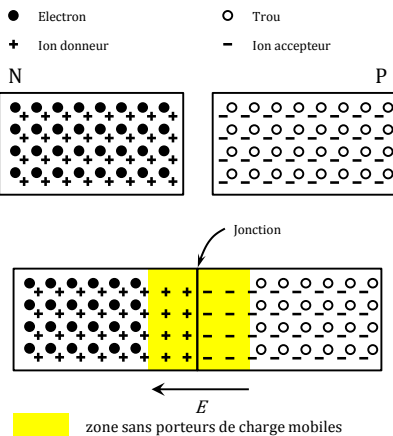
Jean Peyré

P.15

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

### Les semi-conducteurs

#### La jonction PN



Le **semi-conducteur de type N** contient bien plus d'**électrons libres** que le matériaux de **type P**.

Lorsqu'on met en **contact** un semi-conducteur de **type P** et un semi-conducteur de **type N**, par **diffusion**, **les électrons du type N vont combler les trous du type P jusqu'à l'équilibre**.

Ce déplacement laisse **localement une charge nette** due aux dopants fixes ionisés des deux matériaux.

Cette charge nette **induit un champ électrique** qui va limiter la diffusion des charges jusqu'à l'équilibre.

La **ZONE SANS PORTEUR DE CHARGE MOBILE** est dite **ZONE DE CHARGE D'ESPACE, ZONE DE DÉPLÉTION** ou **ZONE DÉPEUPLÉE**. Elle constitue une **barrière de potentiel pour les électrons et les trous**.



Jean Peyré

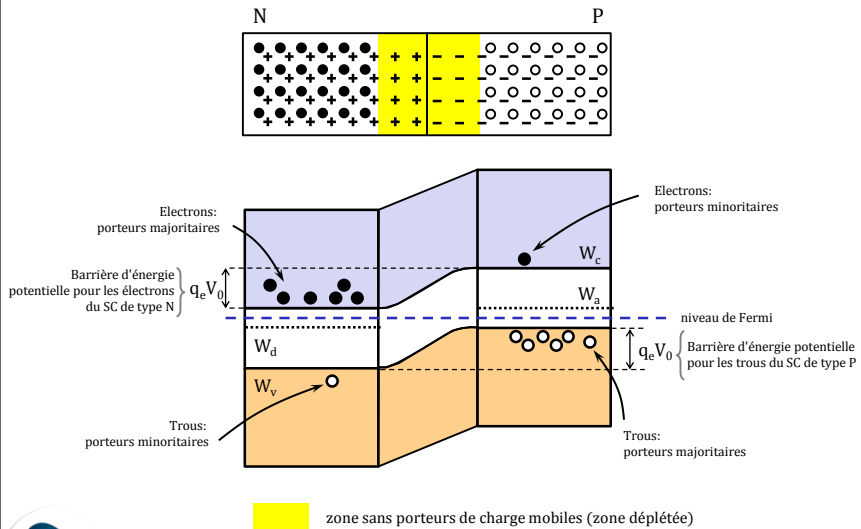
P.16

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



# Les semi-conducteurs

## La jonction PN - Barrière de potentiel $V_0$



Jean Peyré

P.17

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

En 1 seule dimension:

## La jonction PN

- En résolvant l'équation de Poisson:

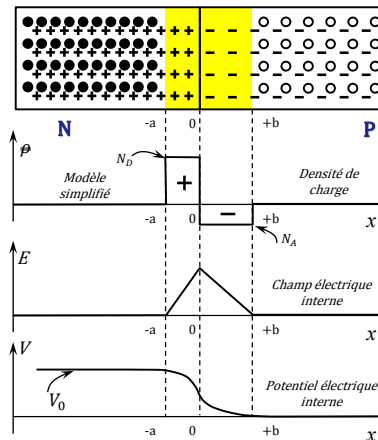
$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{\rho(x)}{\epsilon} = 0$$

$\rho$ : densité volumique de charge  
 $\epsilon$ : constante diélectrique du matériau

$$\begin{aligned} -a < x \leq 0 & \quad V(x) = -\frac{q_e N_D}{2\epsilon} (x + a)^2 + V_0 \\ 0 < x \leq b & \quad V(x) = +\frac{q_e N_A}{2\epsilon} (x - b)^2 \end{aligned}$$

- Continuité du potentiel électrique à la jonction

- Neutralité électrique :  $aN_D = bN_A$



$\epsilon$ : permittivité du matériau  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$$

$$\epsilon_r = 11,9 \text{ (Si) ou } 16 \text{ (Ge)}$$



Jean Peyré

P.18

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN

□ Profondeur de la zone déplétée  $d$

$$d = a + b = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0 (N_A + N_D)}{q_e N_A N_D}}$$

si  $N_D \gg N_A$

$$d \cong b \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N_A}}$$

si  $N_A \gg N_D$

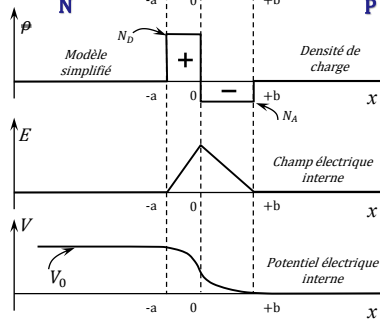
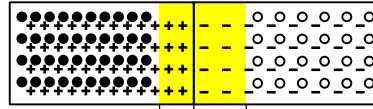
$$d \cong a \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N_D}}$$

Cas général:

$$N = N_A \text{ si } N_D \gg N_A$$

$$N = N_D \text{ si } N_A \gg N_D$$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N}} = \sqrt{2\varepsilon \rho_d \mu V_0}$$



$\rho_d \cong 1/q_e \cdot N \cdot \mu$   $\rho_d$ : résistivité du matériau dopé  
 $\mu$ : mobilité des porteurs majoritaires



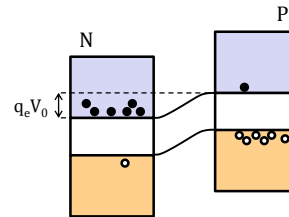
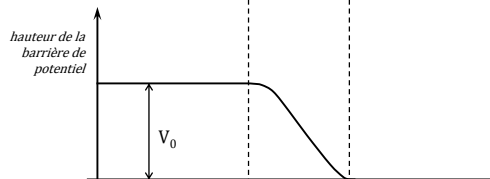
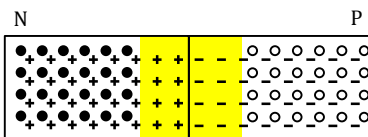
Jean Peyré

P.19

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN - aucune polarisation



zone sans porteurs de charge mobiles (zone déplétée)



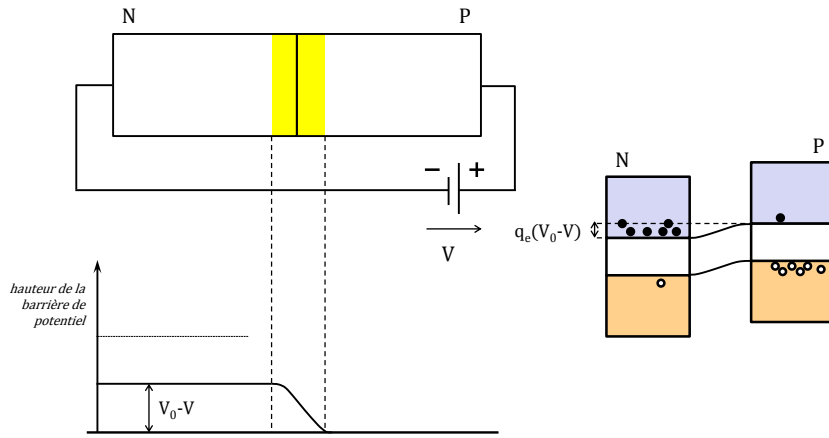
Jean Peyré

P.20

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN - polarisation directe



zone sans porteurs de charge mobiles - la largeur de la zone déplétée diminue



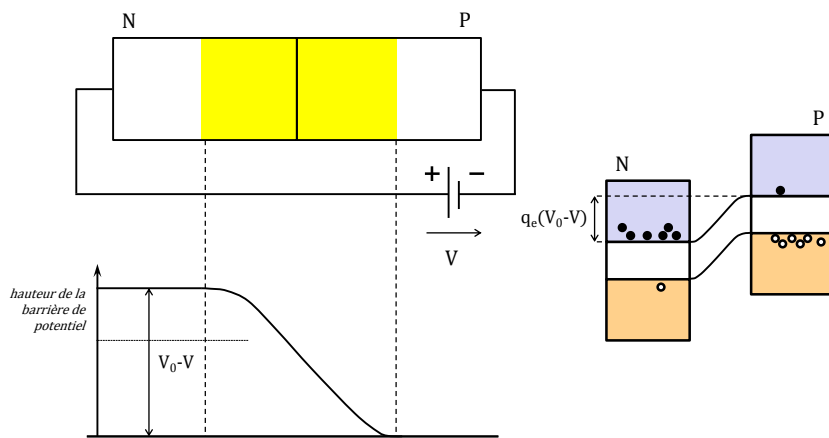
Jean Peyré

P.21

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## La jonction PN - polarisation inverse



zone sans porteurs de charge mobiles - la largeur de la zone déplétée augmente



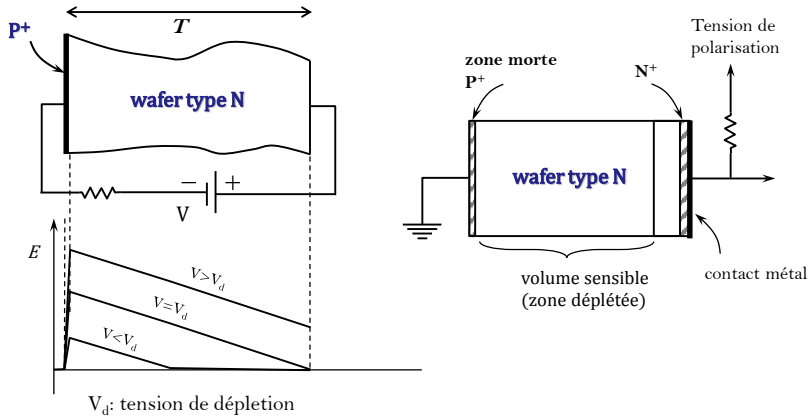
Jean Peyré

P.22

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Jonction P+N polarisée en inverse



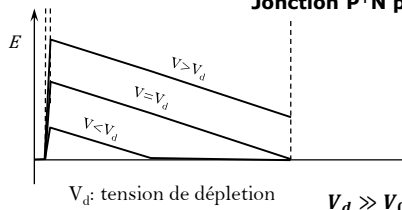
Jean Peyré

P.23

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Jonction P+N polarisée en inverse



"d" correspond à la profondeur de déplétion. "T" correspond à l'épaisseur du wafer et est aussi la profondeur de détection (zone déplétée) pour  $V_d$

$V_d$ : tension de déplétion  
 $V_d \gg V_0$   
 $V_0 + V_d \cong V_d$

$V < V_d$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_0+V)}{q_e N_D}} \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N_D}}$$

$V \geq V_d$

$$\left\{ \begin{aligned} d = T &\cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_d}{q_e N_D}} \\ \Rightarrow V_d &\cong \frac{q_e N_D T^2}{2\varepsilon} \end{aligned} \right.$$

**Cas général:** Jonction P+N:  $N=N_D$   
 ou N+P :  $N=N_A$

$V < V_d$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N}} = \sqrt{2\varepsilon \rho_d \mu V}$$

$V \geq V_d$

$$T \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_d}{q_e N}}$$

$$V_d \cong \frac{q_e N \cdot T^2}{2\varepsilon}$$



Jean Peyré

P.24

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### La jonction PN "planaire" - formules pratiques

□ Profondeur de la zone déplétée  $d$   $\rho_d \rightarrow \Omega.cm, V \rightarrow V$  et  $d \rightarrow \mu m$

$$d \cong \sqrt{2\varepsilon\rho_d\mu V}$$

$\rho_d$ : résistivité du matériau dopé  
 $\mu$ : mobilité des porteurs majoritaires

**Silicium à 300°K**

type N  $d = 0,533\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 0,318\sqrt{\rho_d V}$

**Silicium à 77°K**

type N  $d = 2,103\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 1,522\sqrt{\rho_d V}$

**Germanium à 300°K**

type N  $d = 1,051\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 0,733\sqrt{\rho_d V}$

**Germanium à 77°K**

type N  $d = 3,193\sqrt{\rho_d V}$

type P  $d = 3,449\sqrt{\rho_d V}$

□ Capacité par unité de surface  $C = \frac{\varepsilon}{d}$   $\varepsilon$ : permittivité du matériau  $\varepsilon_0 = 8,85 pF/m$   
 $d$ : profondeur de la zone déplétée  $\varepsilon_r = 11,9$  (Si) ou 16 (Ge)

**Silicium**  $C(pF/mm^2) = \frac{105}{d(\mu m)}$

**Germanium**  $C(pF/mm^2) = \frac{142}{d(\mu m)}$



Jean Peyré

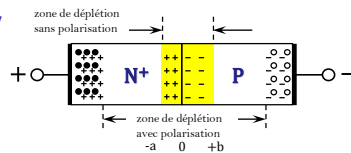
P.25

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### La jonction PN - exemple

➤ **Jonction polarisée en inverse à 300 V**



**Silicium**

type N  $d \cong 0,53\sqrt{\rho_n V} = 1,3mm$

type P  $d \cong 0,32\sqrt{\rho_p V} = 0,8mm$

avec  $\rho = 20000 \Omega.cm$  et  $V = 300V$

Si  $N_D \gg N_A$  (at/cm<sup>3</sup>), cela signifie que:

$$b \gg a$$

**La zone déplétée se trouve presque complètement du côté P (zone sensible de détection). On parle alors de jonction PN<sup>+</sup>**



Jean Peyré

P.26

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### Principales caractéristiques

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>3</sup>
largeur bande interdite E <sub>g</sub>	0,74 @77°K	1,1@300°K	eV
Permittivité relative ε <sub>r</sub>	16	11,9	
Mobilité électrons @300°K	3900	1350	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @300°K	1900	480	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité électrons @77°K	36000	21000	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @77°K	42000	11000	cm <sup>2</sup> /Vs
n <sub>i</sub> @300°K	2,4 x 10 <sup>13</sup>	1,45 x 10 <sup>10</sup>	cm <sup>-3</sup>
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	Ω.cm



Jean Peyré

P.27

$\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$   
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## IV - Comment fonctionne un détecteur à semi-conducteurs ?

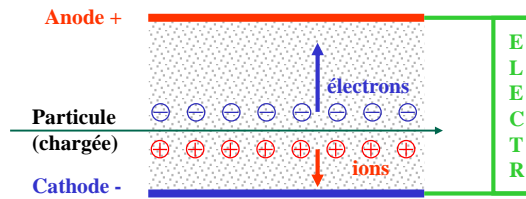


Jean Peyré

P.28

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les 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

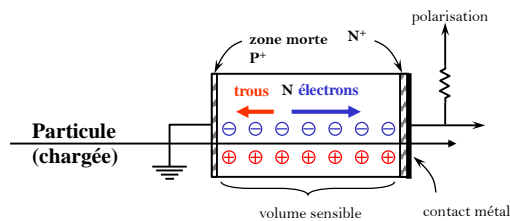


Jean Peyré

P.29

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les détecteurs à semi-conducteurs



### 1. Ionisation

→ Création de paires ~~électrons / ions~~

**électrons / trous**

### 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



Jean Peyré

P.31

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Fonctionnement d'un détecteur SC

Création d'une zone sans porteur de charge



Interaction rayonnement matière dans cette zone désertée (déplétée)



Création de paires électrons-trous



Collection des paires par application d'un champ électrique.



**La jonction PN**  
(Si & Ge):

- mise en contact de 2 semi-conducteurs  
d'un même matériau de dopages P et N.



**Détecteur homogène**  
(C, CdTe, CdZnTe, HgI<sub>2</sub>,...):

- semi-conducteur de très haute résistivité.  
- deux faces opposées sont munies d'électrodes.



Jean Peyré

P.32

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## V - Caractéristiques de détection des jonctions PN



Jean Peyré

P.33

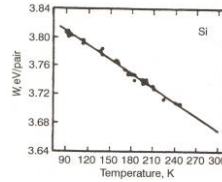
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



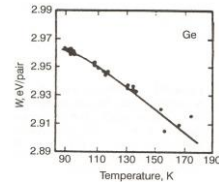
## Les semi-conducteurs

### Energie moyenne pour créer une paire é-trou

	Ge	Si	unité
w @77°K	2,96	3,81	eV/paire
w @300°K		3,62	eV/paire



Silicium



Germanium

$$n_0 = \frac{E}{w}$$

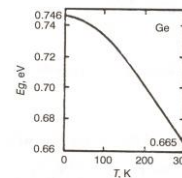
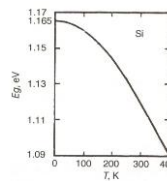
$n_0$ : nombre de paires primaires créées

$E$ : énergie moyenne déposée par évènement (eV)

$w$ : Energie moyenne pour produire une paire chargée (eV/paire)

### Bande interdite en fonction de la température

	Ge	Si	unité
$E_g$	0,74	1,1	eV
	@77°K	@300°K	



Jean Peyré

P.34

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### Déplacement des électrons et des trous

- ❑ Sous l'action d'un champ électrique, les électrons et les trous ont une vitesse de dérive dans un semi-conducteur:

$$v_e = \mu_e E$$

$$v_h = \mu_h E$$

$v_e, v_h$  = vitesse de dérive des électrons & des trous ( $cm.s^{-1}$ )

$\mu_e, \mu_h$  = mobilité ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )

$E$  = champ électrique ( $V.cm^{-1}$ )

- ❑ A 300°K, pour le silicium,  $\mu_e=1350 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h=480 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
- ❑ A 300°K, pour le germanium,  $\mu_e=3900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_h=1900 cm^2.V^{-1}.s^{-1}$

Facteur ~1000 fois supérieur comparé  
au déplacement des ions dans les gaz...

**GAZ**

**ions:**

$\approx 1 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$

**électrons:**

$\approx 1000 cm^2.atm.V^{-1}.s^{-1}$



Jean Peyré

P.35

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

### Principales caractéristiques

	Ge	Si	unité
Numéro atomique Z	32	14	
Masse atomique A	72,6	28,1	
Densité	5,32	2,33	g/cm <sup>3</sup>
largeur bande interdite E <sub>g</sub>	0,74 @77°K	1,1@300°K	eV
Permittivité relative ε <sub>r</sub>	16	11,9	
Mobilité électrons @300°K	3900	1350	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @300°K	1900	480	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité électrons @77°K	36000	21000	cm <sup>2</sup> /Vs
Mobilité trous @77°K	42000	11000	cm <sup>2</sup> /Vs
n <sub>i</sub> @300°K	2,4 x 10 <sup>13</sup>	1,45 x 10 <sup>10</sup>	cm <sup>-3</sup>
Résistivité intrinsèque à 300°K	~ 45	~ 230000	Ω.cm



Jean Peyré

P.36

ε<sub>0</sub> = 8,85 pF/m  
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Influence sur les électrodes

et non pas "collection des charges"

### Théorème de Shockley-Ramo

Le théorème de Shockley-Ramo permet de calculer facilement le courant instantané induit par une charge en mouvement entre 2 électrodes. Elle est basée sur la notion que le **courant induit** dans l'électrode est dû au **mouvement des charges**, et non à la quantité de charge reçue par l'électrode par seconde.

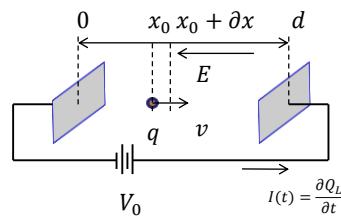
$$\partial Q_L = \frac{\partial x}{d} q$$

*I* et *Q<sub>L</sub>*: courant et charge induit dans le circuit extérieur

*q*: charge en mouvement

*L*: distance entre les électrodes

*∂x*: distance parcourue par la charge



Ces équations sont normalement valable pour un volume vide entre électrodes. On montre que cela est également valable en présence de charges d'espace (SC).



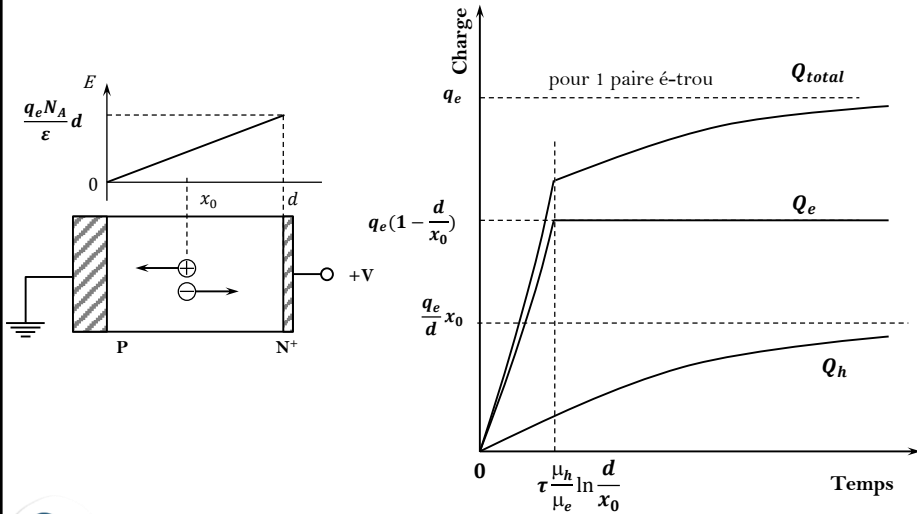
Jean Peyré

P.37

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Les semi-conducteurs

## Influence sur les électrodes



Jean Peyré

P.38

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## VI - Détecteurs à diode silicium



Jean Peyré

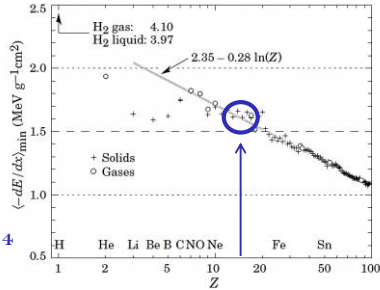
P.39

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Utilisation en physique de hautes énergies Mesure de la position

### Détecteurs de « Vertex » ou de « Traces »

Stopping power at minimum ionization for the chemical elements. The straight line is fitted for  $Z > 6$ .



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

Particule au Minimum  
d'ionisation (mip) :

Si:  $Z=14$

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)

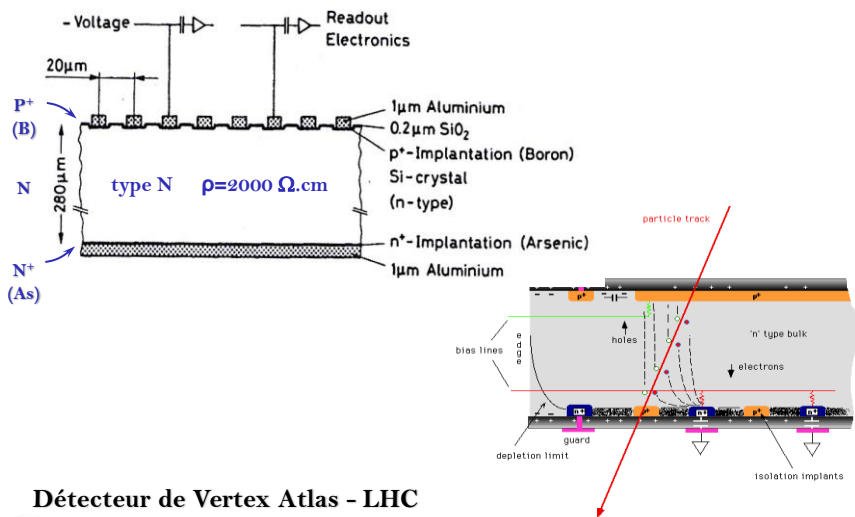


Jean Peyré

P.40

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les détecteurs microstrips



Détecteur de Vertex Atlas - LHC

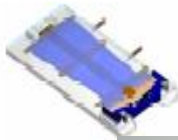


Jean Peyré

P.41

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Détecteur au Silicium dans Atlas



STC d'ATLAS

Plaquette 6 cm x 6 cm

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

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

Épaisseur 300  $\mu\text{m}$

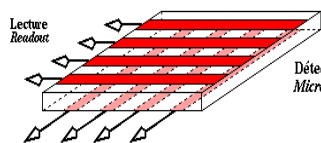


Jean Peyré

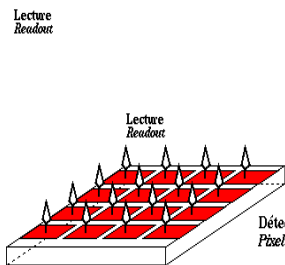
P.42

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

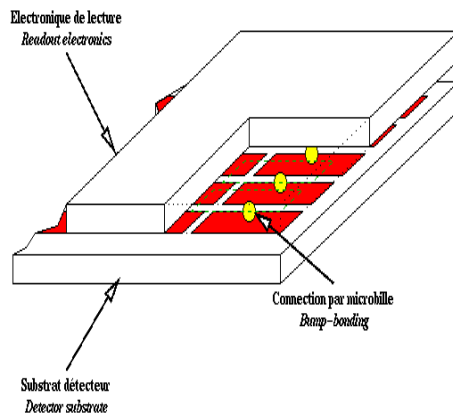
## Les détecteurs à Pixels



Détecteur à micropistes  
*Microstrip detector*



Détecteur à pixels  
*Pixel detector*

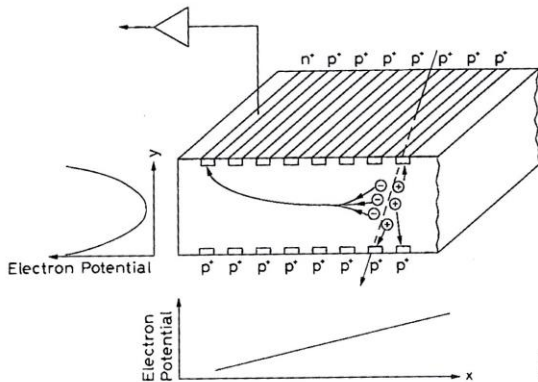


Jean Peyré

P.43

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les détecteurs à dérivation



Structure PNP

- Qui produit un puits de potentiel
- Les électrons dérivent vers l'électrode de lecture en 100 ns à 100  $\mu$ s.

Proposé en 1983 par  
Emilio Gatti & Pavel Rehak

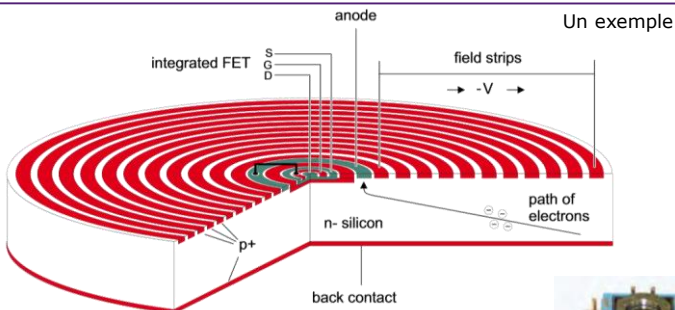


Jean Peyré

P.44

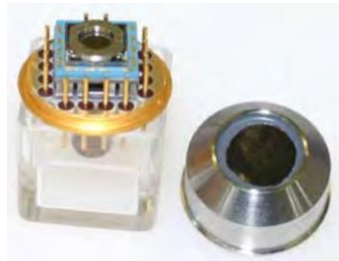
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les détecteurs à dérivation



Un exemple

Module de détection SDD, cellule PELTIER et support TO8 avec tiges de refroidissement et broches électriques. Le module est enfermé sous atmosphère d'azote dans un boîtier en acier non magnétique avec une fenêtre en béryllium mince ou en polymère.



<http://www.pndetector.de>

Jean Peyré

P.45

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# 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



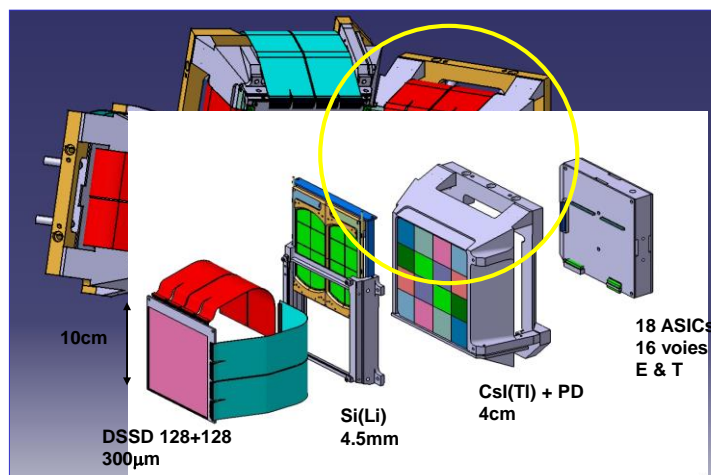
Jean Peyré

P.46

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## The Array

Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL



Jean Peyré

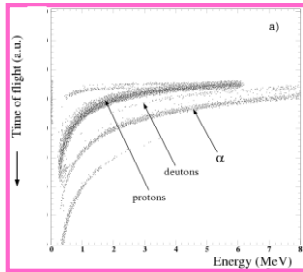
P.47

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# The MUST2 Array

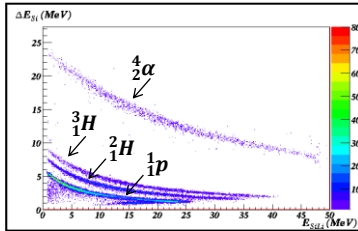
Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL

Temps de Vol  
Energie



Stopping power  
1MeV electrons: 2 mm Si  
6MeV protons: 300 μm Si  
5MeV α: 30 μm Si

DSSD 128+128  
300μm



Perte d'énergie  
Energie

$$\Delta E \propto \frac{AZ^2}{E}$$

18 ASICs  
16 voies  
E & T

Si(Li)  
4.5mm

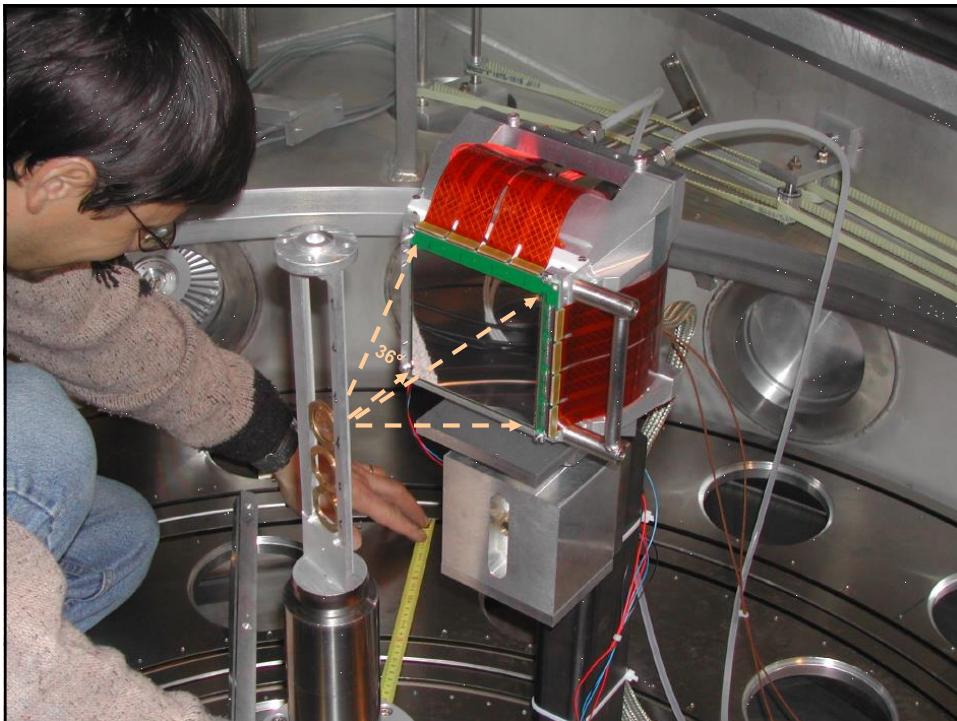
CsI(Tl) + PD  
4cm



Jean Peyré

P.48

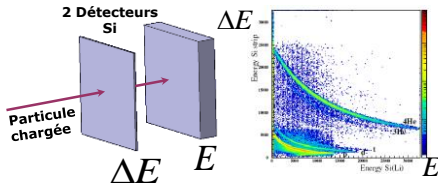
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017





## Identification de Particules par utilisation de l'analyse par discrimination de forme (PSD)

### 1) Méthode actuelle



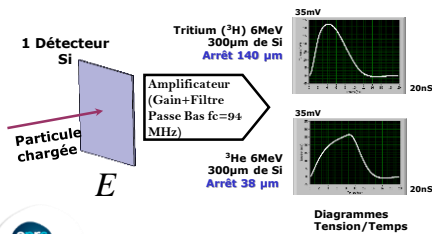
$$\Delta E \propto \frac{AZ^2}{E}$$

$$A = \frac{2E}{(d/t)^2}$$

$Z = \text{Charge particule incidente}$   
 $A = \text{Masse atomique}$

- Particule touche 2 étages :
- Dépôt énergie → 2 étages
  - **très bonne** identification par  $\Delta E/E$

### 2) La solution: analyse par discrimination de forme



- Particule s'arrête dans 1er étage :
- Dépôt énergie → 1 étage
  - Identification **médiocre** par TOF/E (donne A et pas Z)
  - Ex: pb d'identification Tritium et  $^3\text{He}$

⇒ Discrimination par la forme

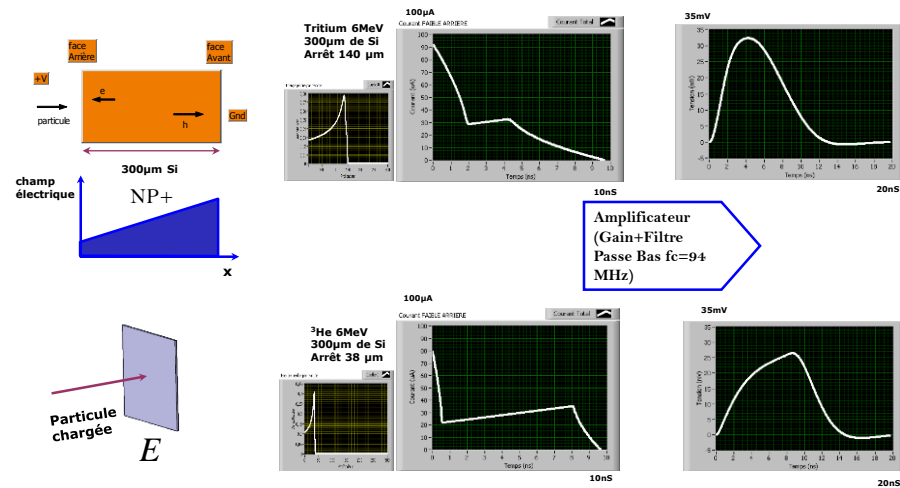


Jean Peyré

P.50

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Identification de Particules par utilisation de l'analyse par discrimination de forme (PSD)



- La forme du signal dépend des effets du champ électrique et du Plasma créé
  - Etudes en mono-voie puis multi-voies
- ⇒ TRAITEMENT DU SIGNAL



Jean Peyré

P.51

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## VII - Détecteurs germanium



Jean Peyré

P.52

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Les semi-conducteurs

- Germanium

- Densité :  $5,32 \text{ g.cm}^{-3}$
- Mobilité des trous :  $42000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  à  $77^\circ \text{K}$
- Mobilité des électrons :  $36000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  à  $77^\circ \text{K}$
- Utilisation à des températures cryogéniques ( $77^\circ \text{K}$ -azote liquide) afin de limiter la génération thermique de porteurs (faible gap  $E_g = 0,67 \text{ eV}$ )
- $w = 2,96 \text{ eV}$  à  $77^\circ \text{K}$

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{q_e N}}$$

*d*: profondeur zone déplétée

*V*: tension de polarisation inverse

*ε*: constante diélectrique du matériau

$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

*N* = taux d'impureté dans le Semi Conducteur

(souvent noté  $N = |N_A - N_D|$  pour les détecteurs Ge)

A une tension donnée, pour augmenter **d** il faut diminuer **N**:

→ (HPGe)  $d \gg 1 \text{ cm}$   **$10^9$  à  $10^{10} \text{ at/cm}^3$**  pour  **$10^{22} \text{ at/cm}^3$**

→ avoir une zone intrinsèque (compensation Ge(Li)) -- haute résistivité ( $100\,000 \Omega \cdot \text{cm}$ )

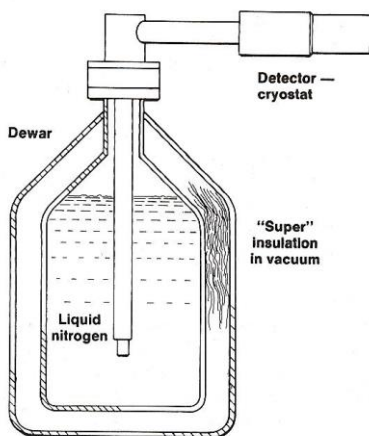


Jean Peyré

P.53

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Détecteurs au Germanium Détection de photons

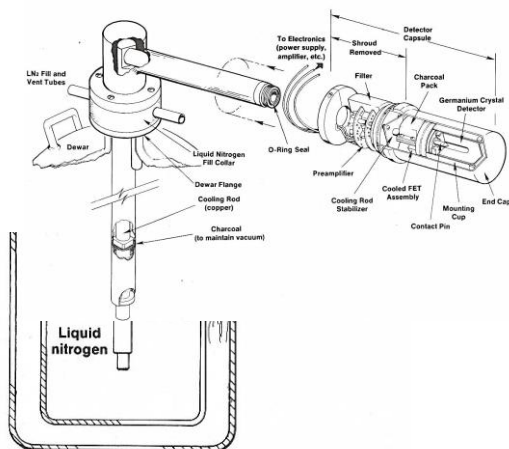


Jean Peyré

P.54

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Détecteurs au Germanium Détection de photons



Jean Peyré

P.55

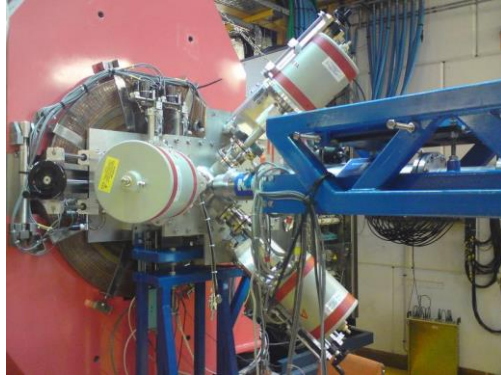
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## projet FLUO-X @ GANIL



Montage de la  
mécanique support  
d'un détecteur  
Germanium

Réglage et  
alignement



3 détecteurs Germanium  
Vis a billes pour réglage de la focale  
Plaque demi-sphère à 3 piquages pour chambre à vide

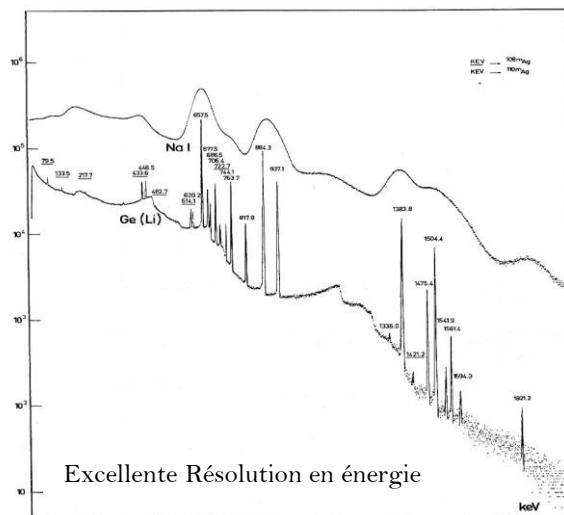


Jean Peyré

P.56

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Détecteurs au Germanium Détection de photons



Jean Peyré

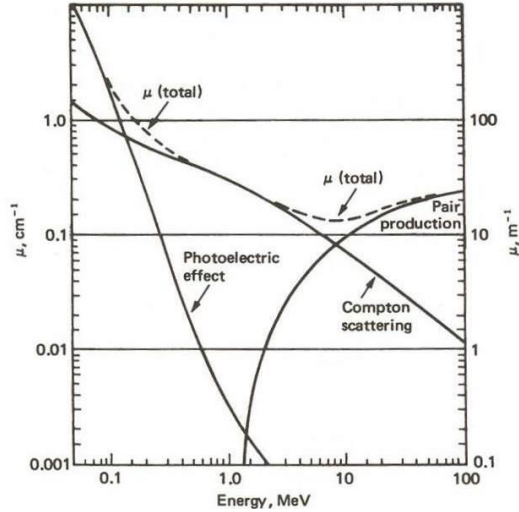
P.57

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

### Coefficients d'atténuation dans le Germanium



Jean Peyré

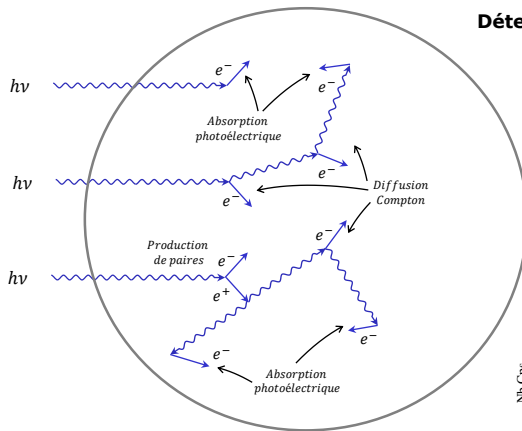
P.58

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

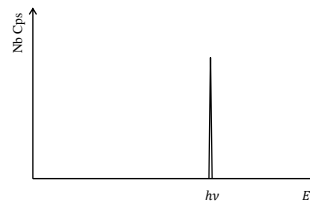
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

### Détecteurs de grand volume



### Spectre en énergie



Jean Peyré

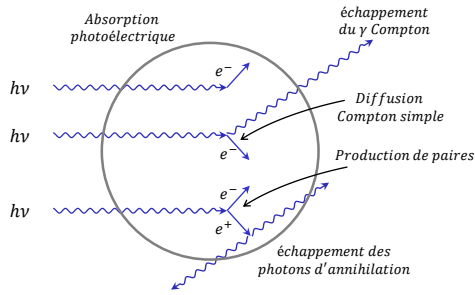
P.59

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

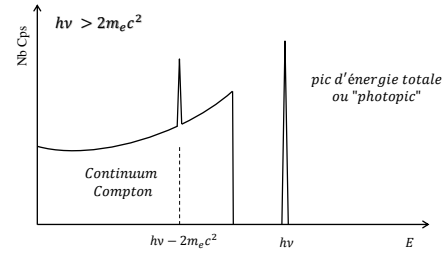
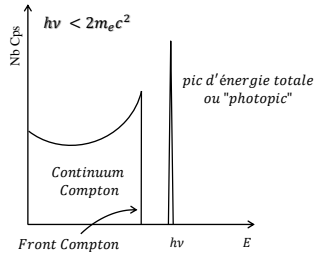
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

Détecteurs de petit volume



Spectres en énergie



Jean Peyré

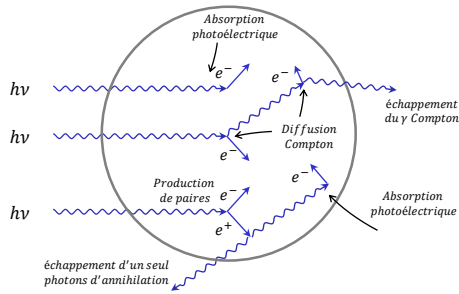
P.60

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

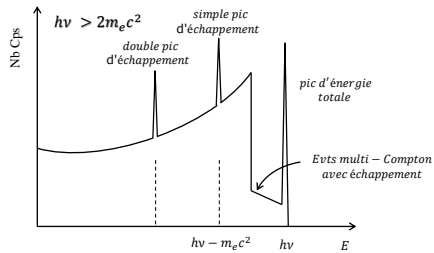
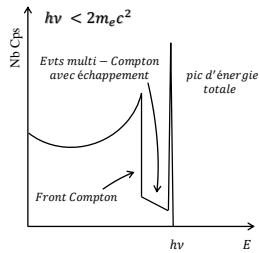
# Détecteurs au Germanium

## Détection de photons

Détecteurs de volume intermédiaire



Spectres en énergie

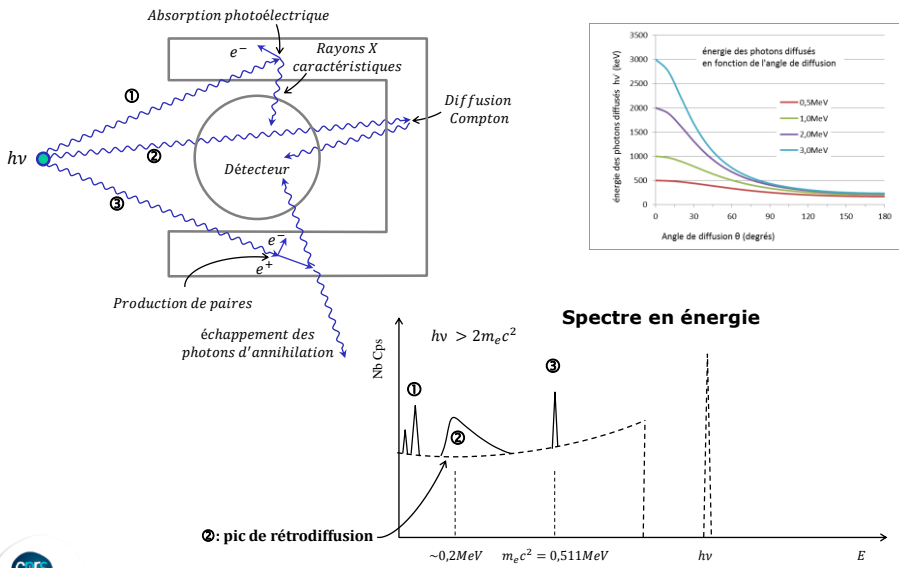


Jean Peyré

P.61

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Effet des matériaux environnants



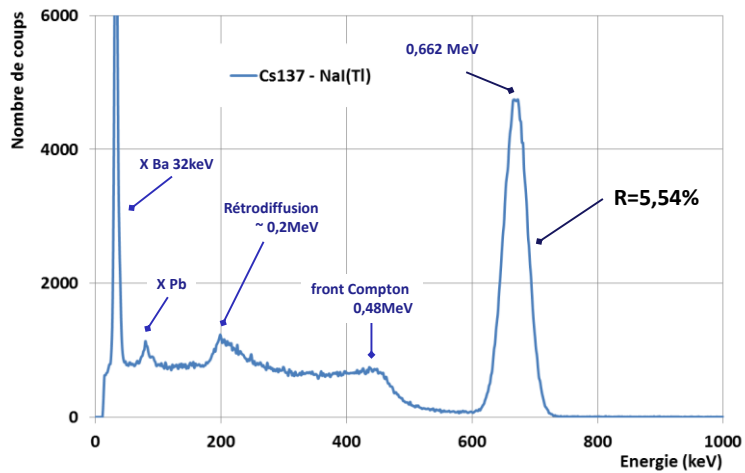
Jean Peyré

P.62

Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



Jean Peyré

P.63

Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

# VII\_a - Les détecteurs "planaires"



Jean Peyré

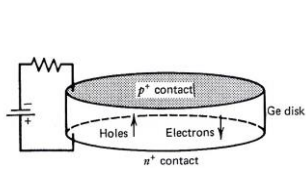
P.64

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

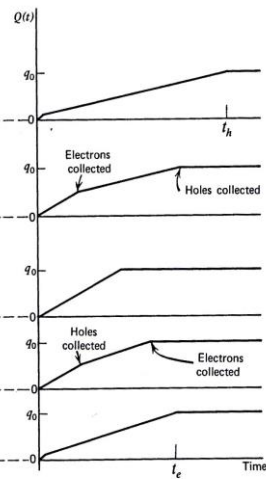
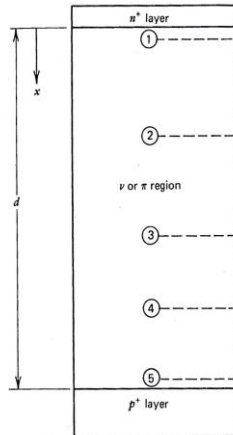
## Détecteurs au Germanium

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

Détecteur planaire



Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)



Jean Peyré

P.65

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## VII\_b - Les détecteurs "coaxiaux"



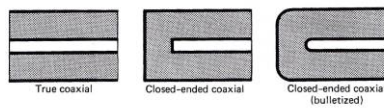
Jean Peyré

P.66

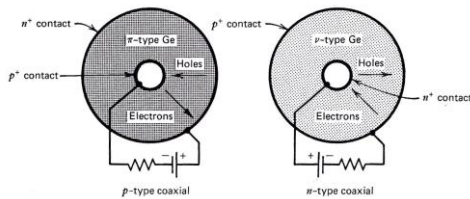
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

### Détecteurs au Germanium Détecteur coaxial

#### Détecteur coaxial

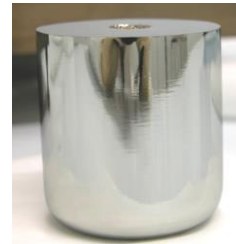


— represents electrical contact surface



**Figure 12-2** At the top are shown the three common shapes of large-volume coaxial detectors. Each represents a cross-sectional view through the axis of a cylindrical crystal. The outer electrode is extended over the flat front (left) surface in both closed-ended cases. Cross sections perpendicular to the cylindrical axis of the crystal are shown at the bottom. The HPGe material may be either high-purity *p* or *n* type. The corresponding electrode configurations are shown for each type.

Détecteur de forte épaisseur  
⇒ mesures  $\gamma$  sur une grande  
gamme énergies



Cristal de Germanium

Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)



Jean Peyré

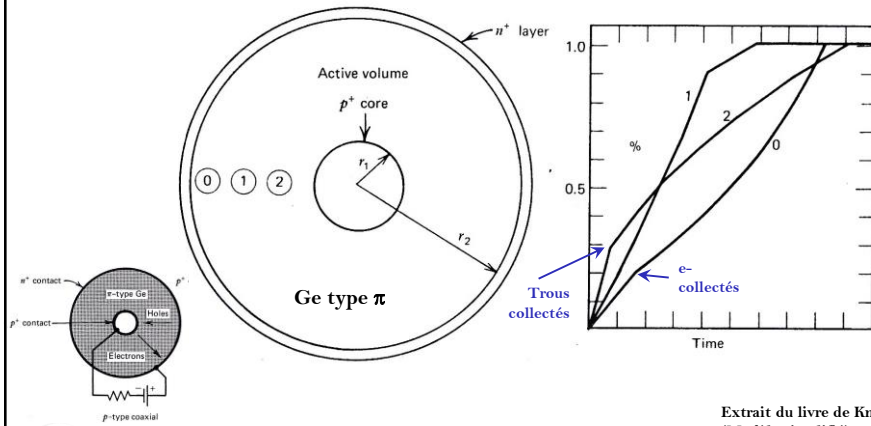
P.67

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Détecteurs au Germanium

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

## Détecteur coaxial

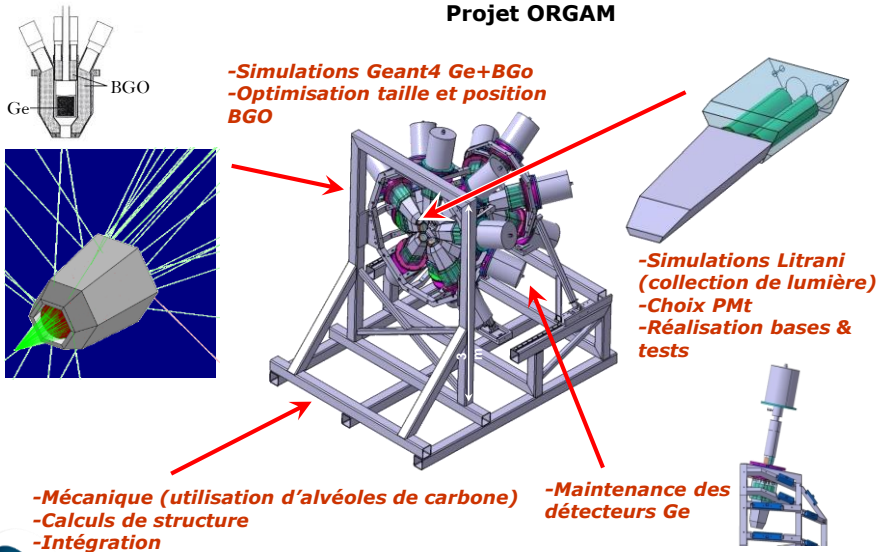


Extrait du livre de Knoll  
(Modèle simplifié)

## VII\_c - "Anti-compton"

## Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

### Projet ORGAM



Jean Peyré

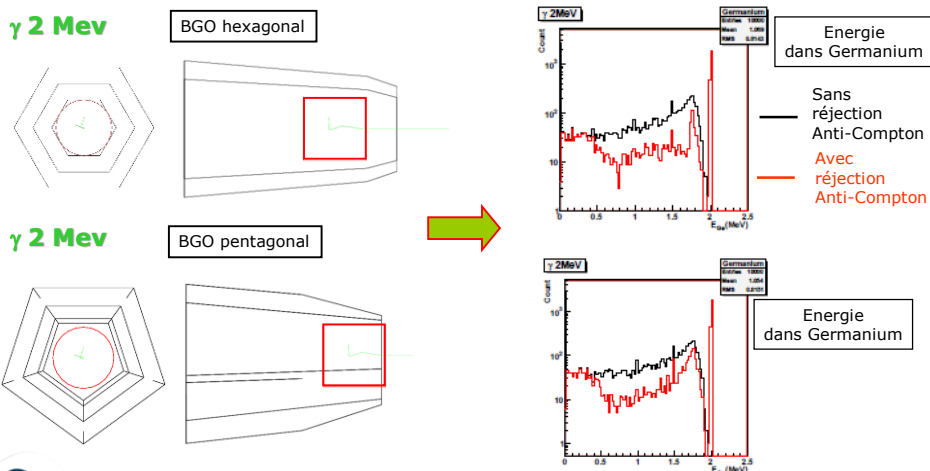
P.70

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

EUROBALL

## Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

- Simulation GEANT4 de la réponse d'un ensemble de détection Germanium + BGO à des photons gammas d'énergie comprise entre 100 keV et 5 MeV.



Jean Peyré

P.71

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

Th Zerguerras

## VII\_d - "Le projet AGATA"



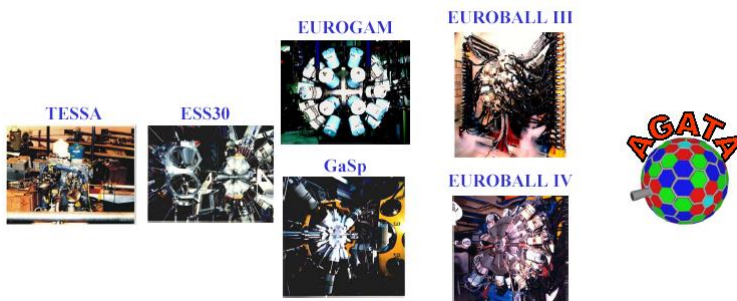
Jean Peyré

P.72

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## AGATA

### Arrays from TESSA0 to AGATA



John Simpson , Nuclear Physics Group

Jean Peyré

P.73



Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

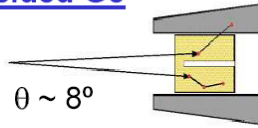
# AGATA

## Idea of $\gamma$ -ray tracking

### Compton Shielded Ge

$\epsilon_{ph} \sim 10\%$   
 $N_{det} \sim 100$

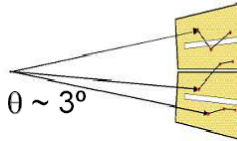
$\Omega \sim 40\%$



large opening angle means poor energy resolution at high recoil velocity

### Ge Sphere

$\epsilon_{ph} \sim 50\%$   
 $N_{det} \sim 1000$

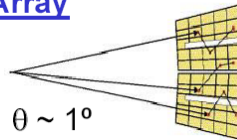


too many detectors are needed to avoid summing effects

### Ge Tracking Array

$\epsilon_{ph} \sim 50\%$   
 $N_{det} \sim 100$

$\Omega \sim 80\%$



#### Combination of:

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



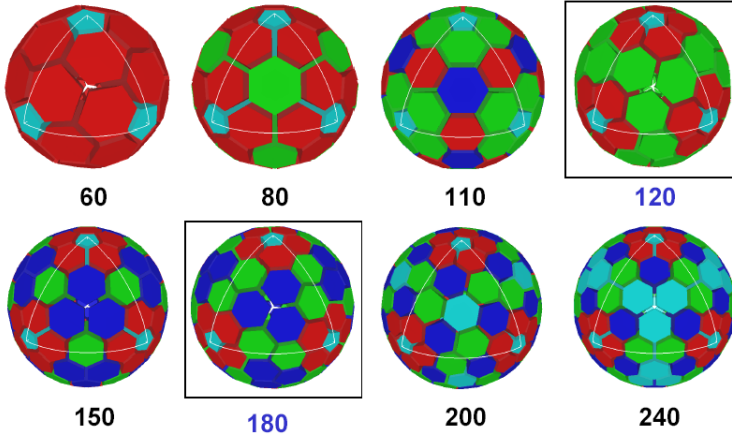
Jean Peyré

P.74

Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

# AGATA

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



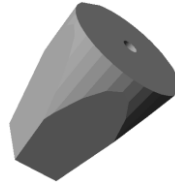
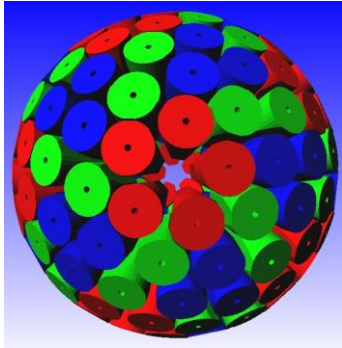
Jean Peyré

P.75

Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

# AGATA

## The $4\pi$ 180 detector Configuration



Ge crystals size:  
length 90 mm  
diameter 80 mm

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% ( $M_\gamma=30$ )

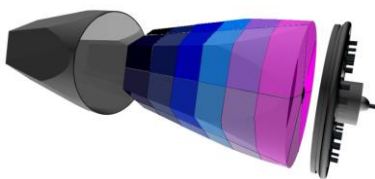


Jean Peyré

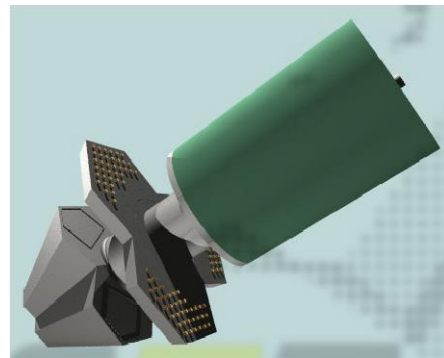
P.76

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## AGATA Detectors



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



3 encapsulated crystals  
111 preamplifiers with cold FET



Jean Peyré

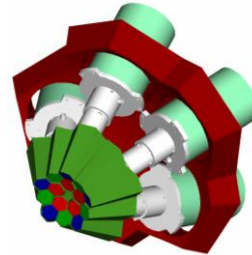
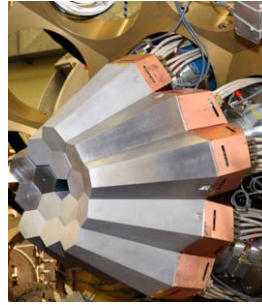
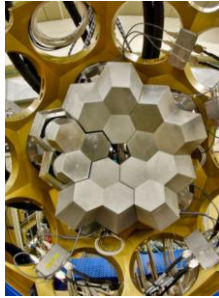
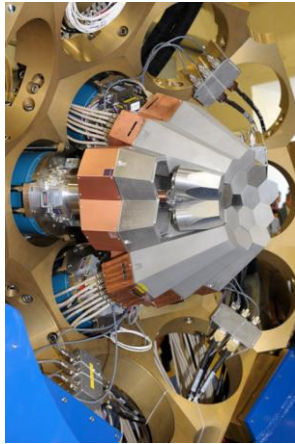
P.77

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## AGATA: Advanced GAMMA Tracking Array



Spectromètre gamma  $4\pi$  constitué  
uniquement de détecteurs Germanium.  
**DEMONSTRATEUR**



Jean Peyré

P.78

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017