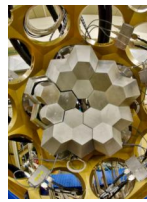
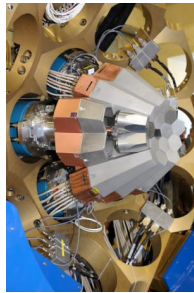


Détecteurs à semi-conducteurs



Jean Peyré

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

91405 Orsay Campus
Tél. : +33 1 69 15 52 13
Fax : +33 1 69 15 50 08
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

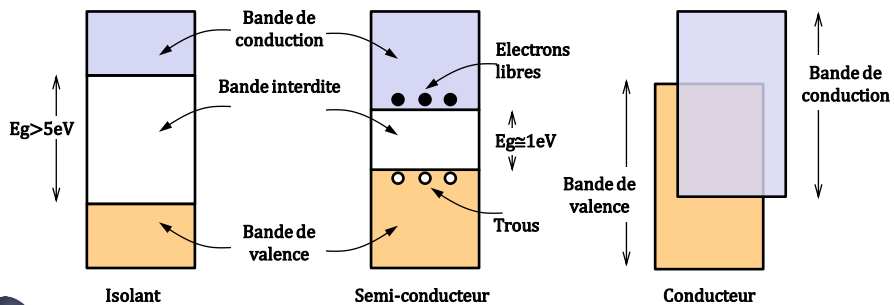
P.2

I - Caractéristiques de base des semi-conducteurs

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.

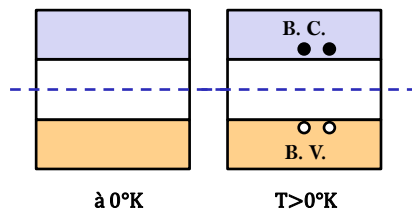
□ A 0°K , la bande de valence des SC intrinsèque est pleine.

→ **pas de conduction possible**

□ A Température $> 0^\circ\text{K}$

La bande de conduction vide n'étant séparée de la bande de valence pleine que par un intervalle relativement faible (de l'ordre de ≈ 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**



P.5

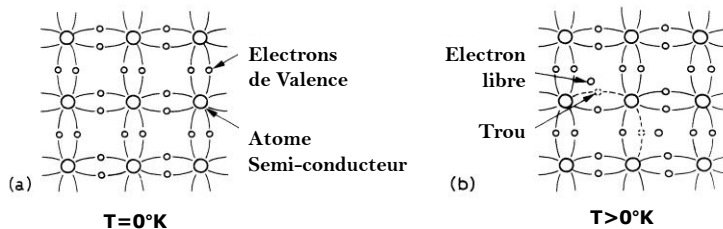
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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 $\approx 5 \times 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$



P.6

UNIVERSITÉ
PARIS
SUD

Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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

- 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

	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 ³
concentration n_i à 273°K	$\approx 4,7 \times 10^{12}$	$\approx 1,3 \times 10^9$	atomes/cm ³
concentration n_i à 77°K	$\approx 3,2 \times 10^{-7}$	$\approx 2,3 \times 10^7$	atomes/cm ³

à T=300°K, $kT \approx 0,025$ eV



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

II - Les semi-conducteurs dopés



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Table périodique des éléments

En pratique il est difficile d'obtenir des matériaux purs. Il subsiste toujours des impuretés (10^9 at/cm³). Par contre, il est facile de doper les cristaux avec des impuretés déterminées. On a alors des **semi-conducteurs extrinsèques**.



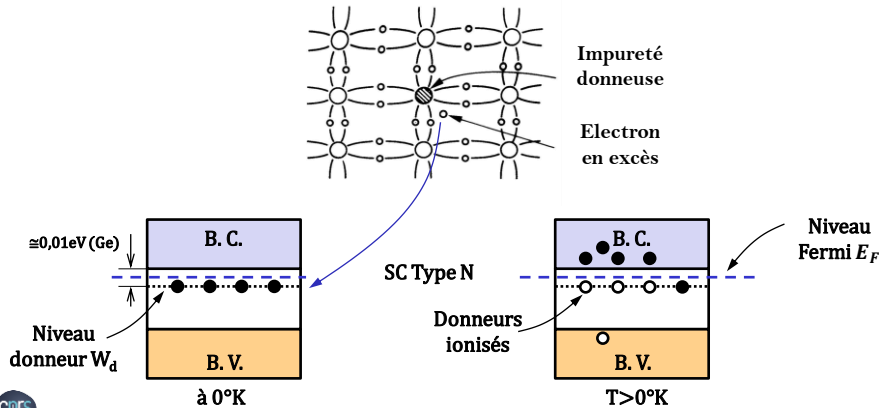
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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**



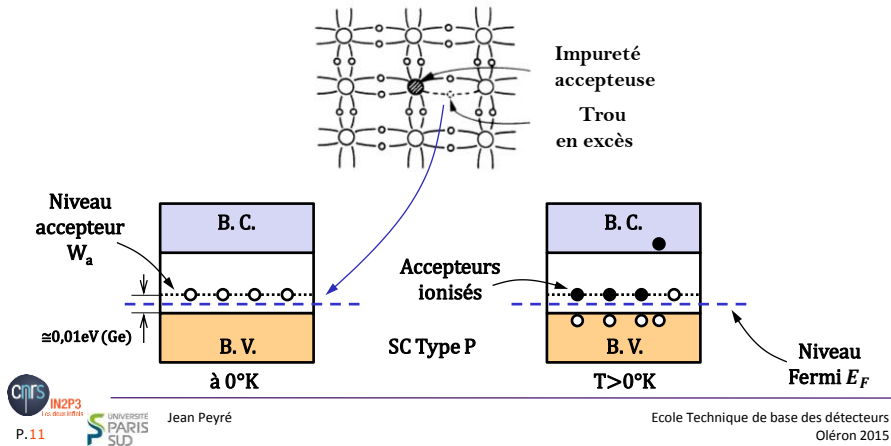
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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 ($T > 0^\circ\text{K}$).**



CNRS
IN2P3
P. 11

UNIVERSITÉ
PARIS
SUD

Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Les semi-conducteurs

Porteurs de charge

- Dopage: 10^{13} a 10^{16} at/cm³ pour 5×10^{22} at/cm³
- **Semi-conducteur de type N à 300°K:**
 - $n \approx N_D$, n nombre d'électrons de conduction (porteurs majoritaires), N_D (at/cm³) nombre d'atomes donneurs
 - résistivité $\rho \approx 1 / q_e \cdot N_D \cdot \mu_e$
- **Semi-conducteur de type P à 300°K :**
 - $p \approx N_A$, p nombre de porteurs majoritaires, N_A (at/cm³) nombre d'atomes accepteurs
 - résistivité $\rho \approx 1 / q_e \cdot N_A \cdot \mu_h$
- **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 ²
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	$\Omega \cdot \text{cm}$

CNRS
IN2P3
P. 12

UNIVERSITÉ
PARIS
SUD

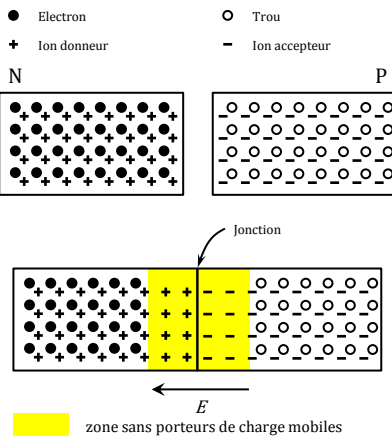
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

III - La jonction PN

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**.

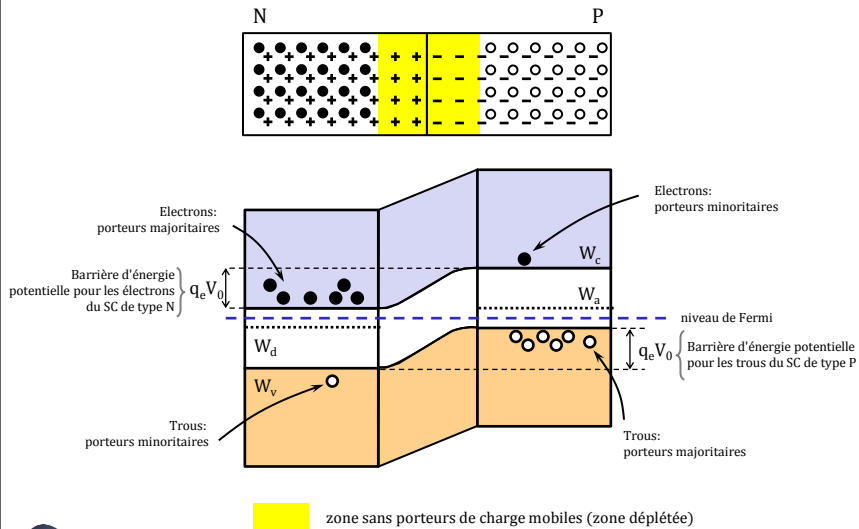
Ce déplacement laisse **localement une charge nette** due aux dopants fixes ionisés des deux matériaux.

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**.

Les semi-conducteurs

La jonction PN - Barrière de potentiel V_0



Les semi-conducteurs

En 1 seule dimension:

La jonction PN

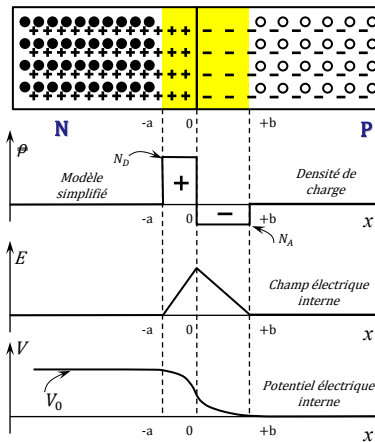
En résolvant l'équation de Poisson:

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

ρ : densité volumique de charge

ϵ : constante diélectrique du matériau

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



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

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

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

Les semi-conducteurs

La jonction PN

□ Profondeur de la zone déplétée d

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

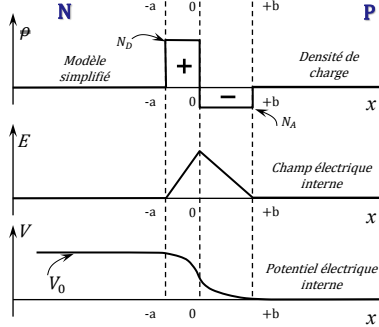
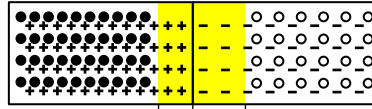
si $N_D \gg N_A$ $d \cong b \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N_A}}$

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

Cas général:

$N = N_A$ si $N_D \gg N_A$
 $N = N_D$ si $N_A \gg N_D$

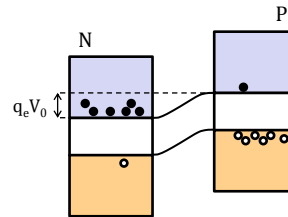
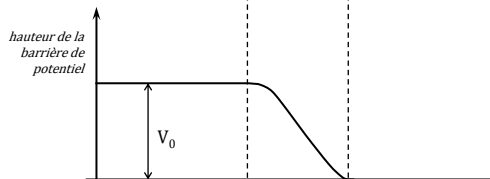
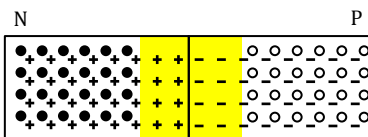
$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0}{q_e N}} = \sqrt{2\varepsilon \rho_d \mu V_0}$$



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

Les semi-conducteurs

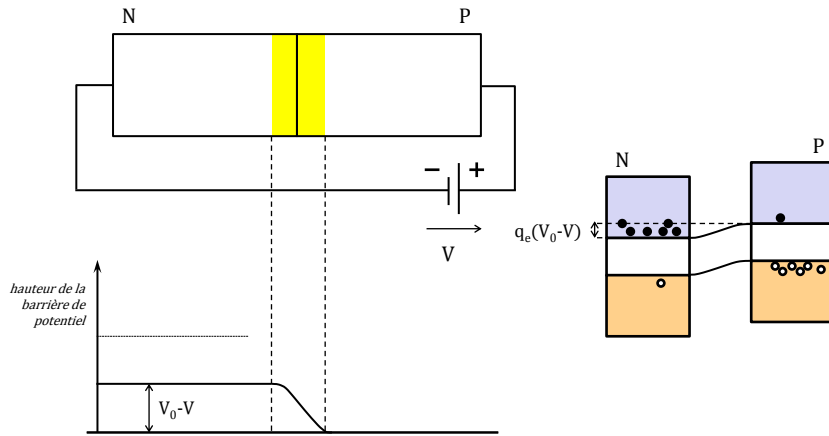
La jonction PN - aucune polarisation



zone sans porteurs de charge mobiles (zone déplétée)

Les semi-conducteurs

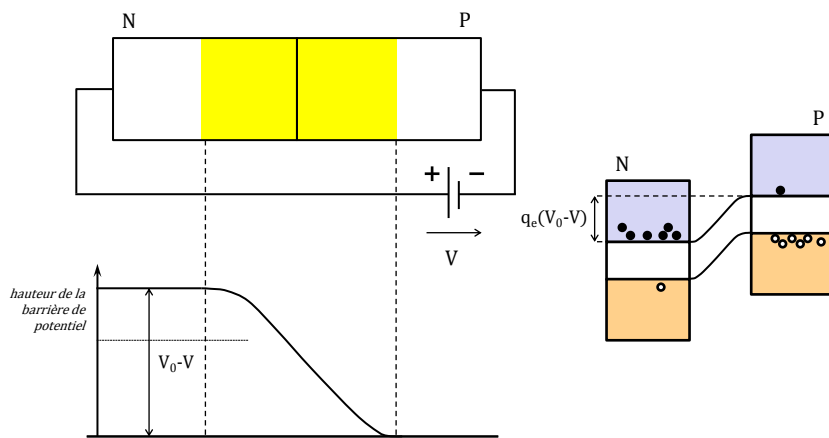
La jonction PN - polarisation directe



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

Les semi-conducteurs

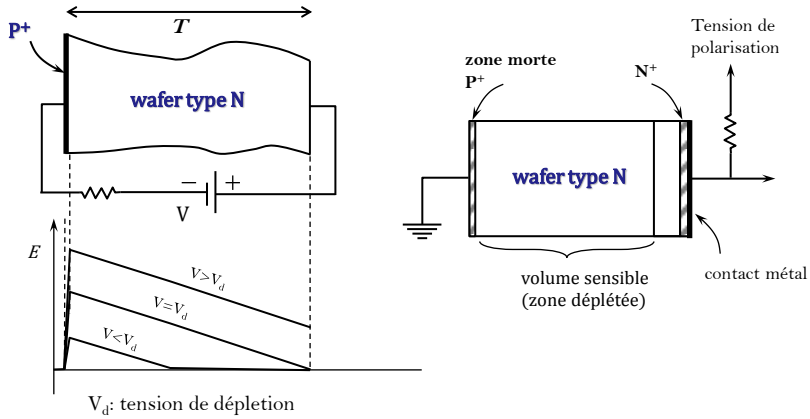
La jonction PN - polarisation inverse



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

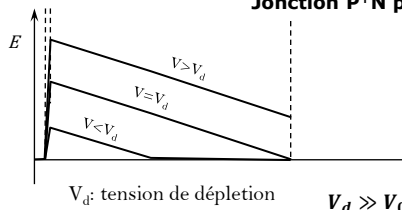
Les semi-conducteurs

Jonction P+N polarisée en inverse



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
 $V_d \gg V_0$
 $V_0 + V_d \cong V_d$

$V < V_d$

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

$V \geq V_d$

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

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

$V < V_d$

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

$V \geq V_d$

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

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

Les semi-conducteurs

La jonction PN "planaire" - formules pratiques

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

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

ρ_d : résistivité du matériau dopé
 μ : 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 $C = \frac{\varepsilon}{d}$ ε : 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 $C(pF/mm^2) = \frac{142}{d(\mu m)}$



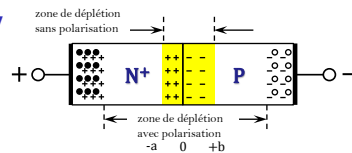
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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/cm³), 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⁺



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Les semi-conducteurs

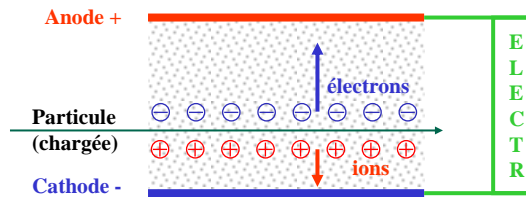
Principales caractéristiques

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

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

IV - Comment fonctionne un détecteur à semi-conducteurs ?

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)

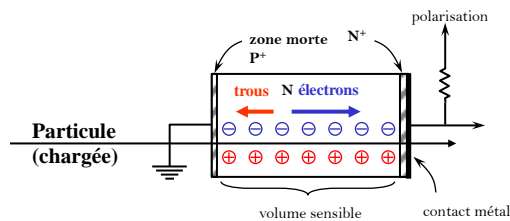
4. Influence sur les électrodes

→ Création du signal

5. Electronique de lecture

→ Traitement du signal

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

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, HgI₂,...):

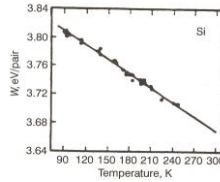
- semi-conducteur de très haute résistivité.
- deux faces opposées sont munies d'électrodes.

V - Caractéristiques de détection des jonctions PN

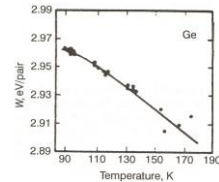
Les semi-conducteurs

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

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

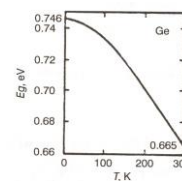
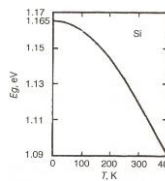
n_0 : nombre de paires primaires créées

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

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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 ($cm.s^{-1}$)

μ_e, μ_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

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Influence sur les électrodes

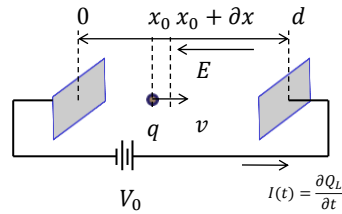
et non pas "collection des charges"

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.

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

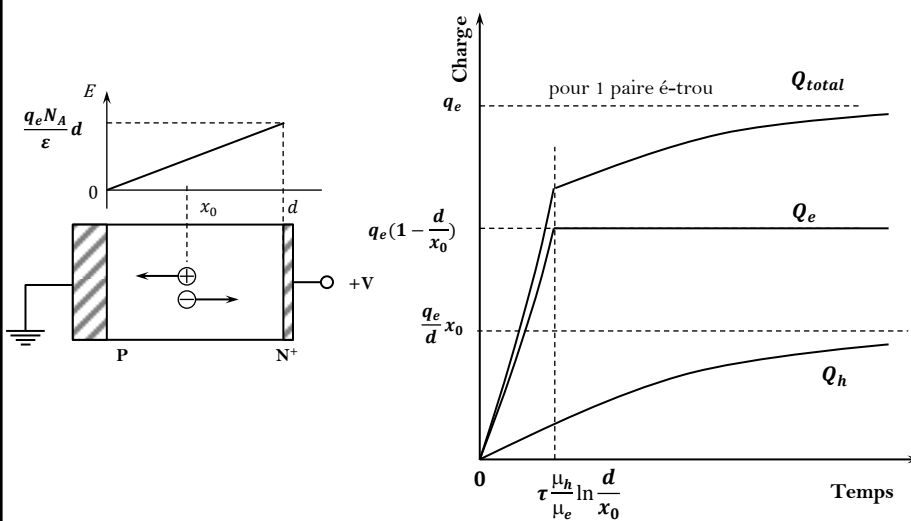
I et Q_L : courant et charge induit dans le circuit extérieur
 q : charge en mouvement
 L : distance entre les électrodes
 ∂x : distance parcourue par la charge



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).

Les semi-conducteurs

Influence sur les électrodes



VI - Détecteurs à diode silicium

Utilisation en physique de hautes énergies Mesure de la position

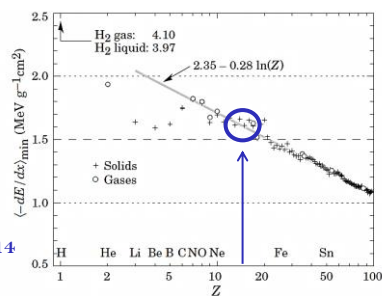
Détecteurs de « Vertex » ou de « Traces »

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

Silicium de 300 μm

Particule au Minimum
d'ionisation (mip) :

Si: $Z=14$



Dans une zone déplétée de 300 μm , un mip dépose une énergie :

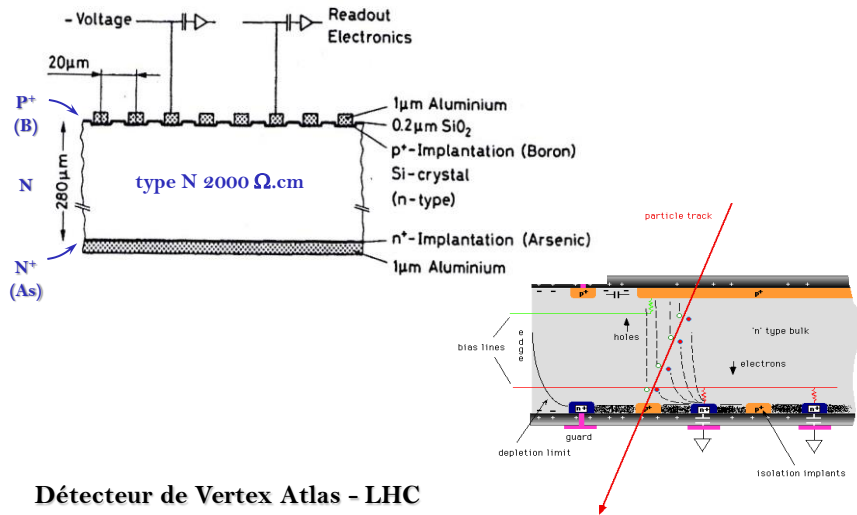
$$E = 0.03 \text{ cm} \times (1.6 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)) \times (2.33 \text{ g}/\text{cm}^3) = 100 \text{ keV}$$

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

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

$$(80 \text{ paires par micron pour un mip})$$

Les détecteurs microstrips



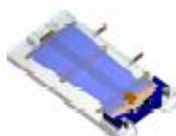
Détecteur de Vertex Atlas - LHC



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Détecteur au Silicium dans Atlas



STC d'ATLAS

Plaquette 6 cm x 6 cm

768 micropistes de 20 μm de large

Lecture tous les 80 μm

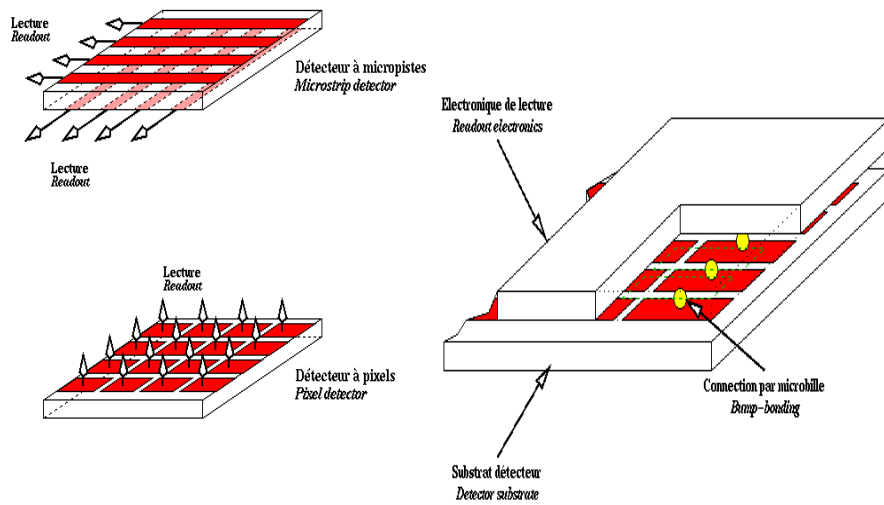
Épaisseur 300 μm



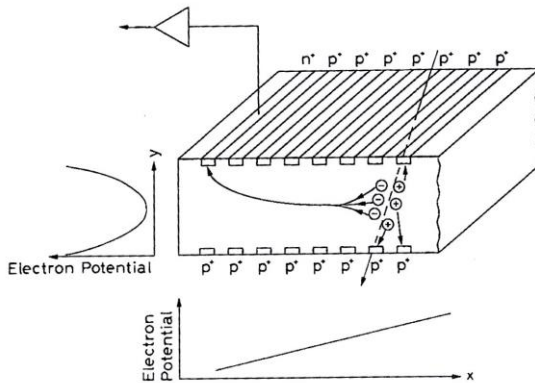
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Les détecteurs à Pixels



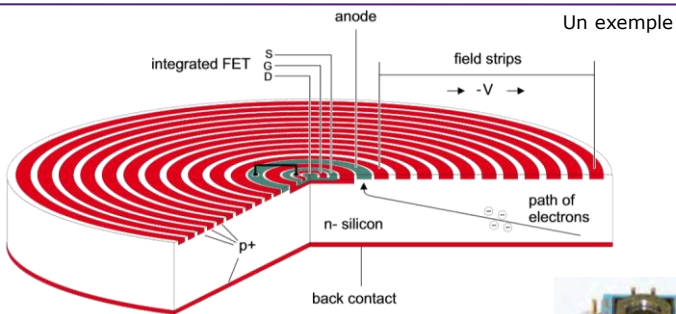
Les détecteurs à dérivation



Structure PNP

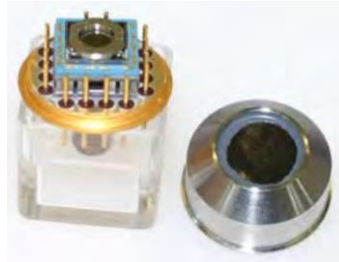
- Qui produit un puits de potentiel
- Les électrons dérivent vers l'électrode de lecture en 100 ns à 100 μ s.

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

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

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

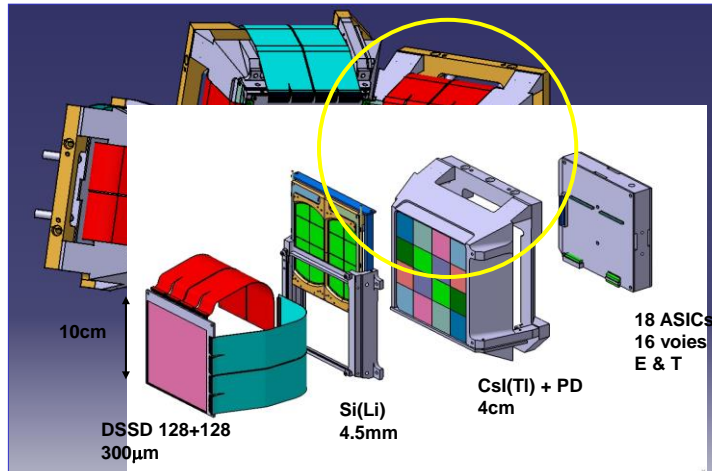


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

The MUST2 Array

Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL



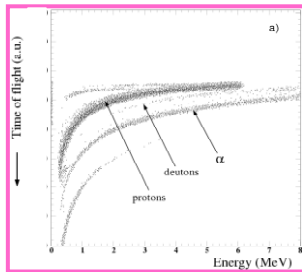
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

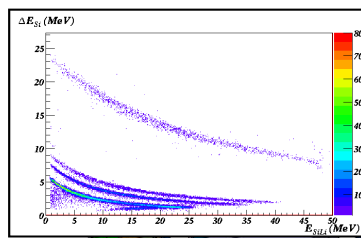
The MUST2 Array

Collaboration: IPNO, SPhN/Saclay, GANIL

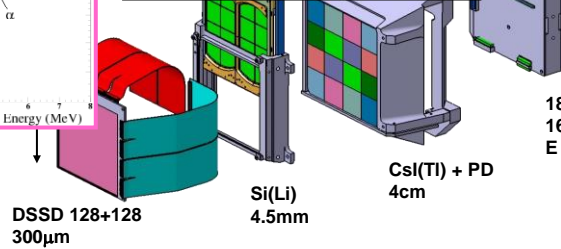
Temps de Vol
Energie



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

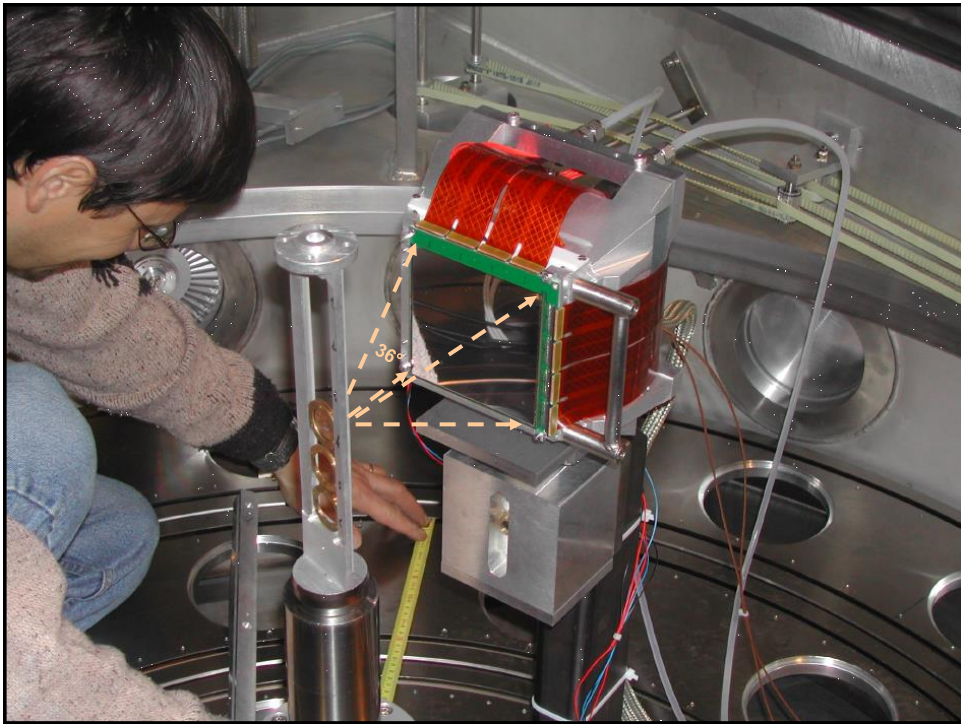


$$\Delta E \propto \frac{AZ^2}{E}$$



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015



VII - Détecteurs germanium

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°K
- Mobilité des électrons : $36000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ à 77°K
- Utilisation à des températures cryogéniques (77°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°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 a 10^{10} at/cm^3** pour **10^{22} at/cm^3**

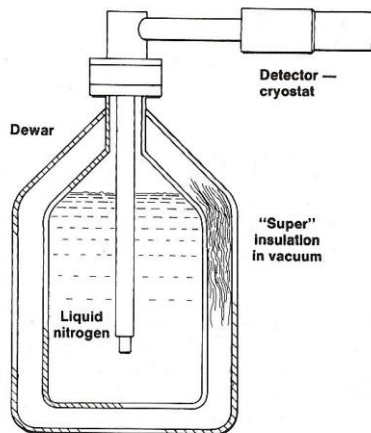
→ avoir une zone intrinsèque (compensation Ge(Li)) -- haute résistivité ($100\,000 \Omega \cdot \text{cm}$)



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

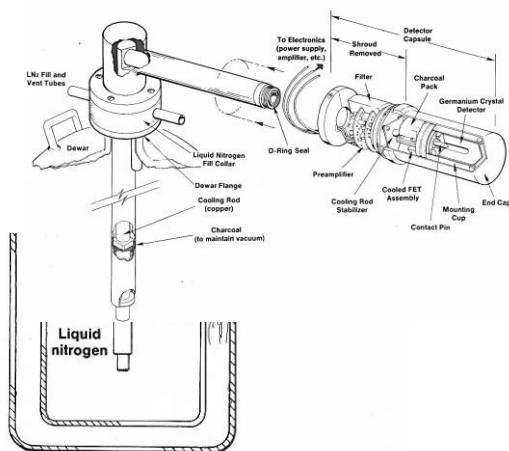
Détecteurs au Germanium Détection de photons



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Détecteurs au Germanium Détection de photons



Jean Peyré

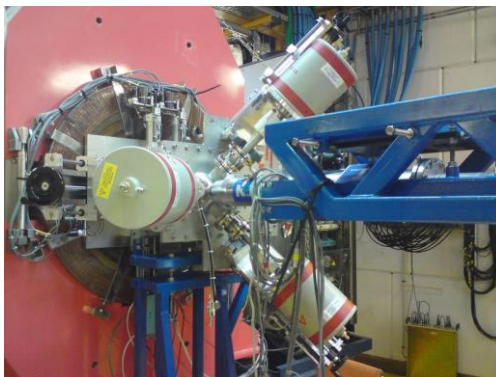
Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

projet FLUO-X @ GANIL



Montage de la
mécanique support
d'un détecteur
Germanium

Réglage et
alignement



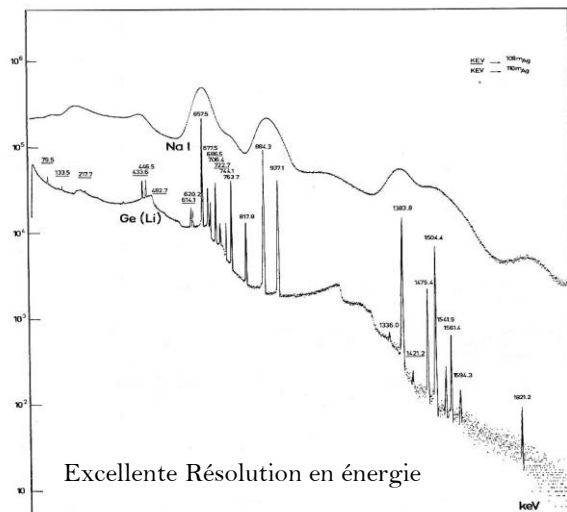
3 détecteurs Germanium
Vis a billes pour réglage de la focale
Plaque demi-sphère à 3 piquages pour chambre à vide



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

DéTECTEURS au Germanium DéTECTION de photons

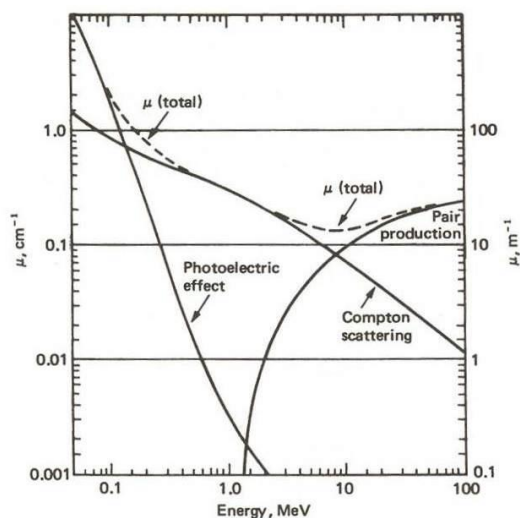


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

DéTECTEURS au Germanium DéTECTION de photons

Coefficients d'atténuation dans le Germanium



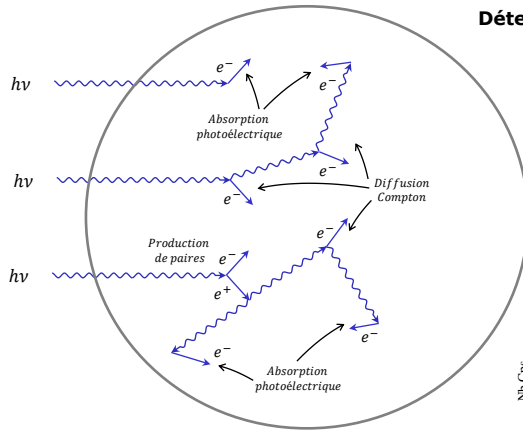
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

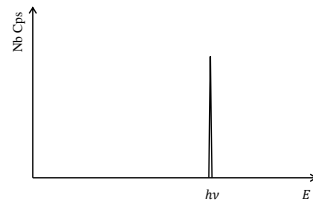
Détecteurs au Germanium

Détection de photons

Détecteurs de grand volume



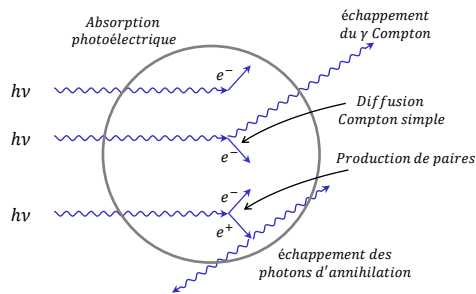
Spectre en énergie



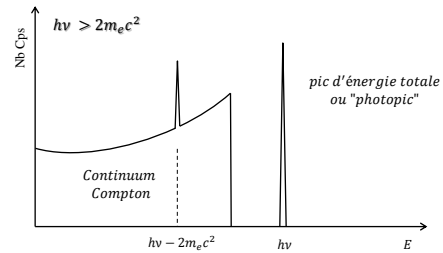
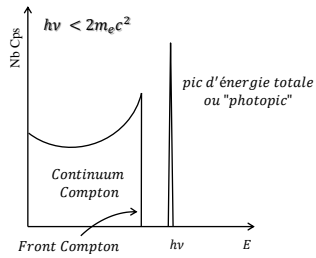
Détecteurs au Germanium

Détection de photons

Détecteurs de petit volume

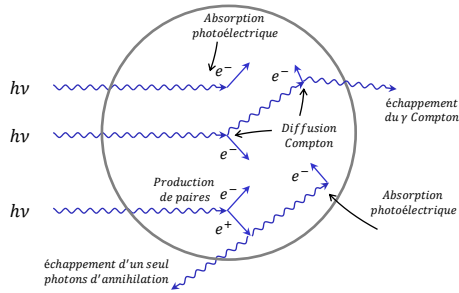


Spectres en énergie

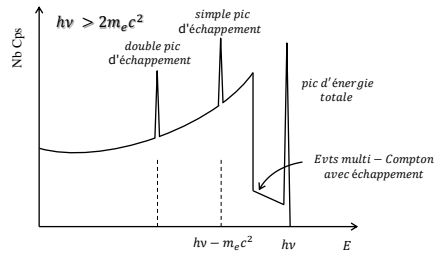
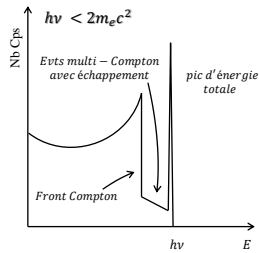


Réponse des détecteurs de taille intermédiaire

Détecteurs de volume intermédiaire



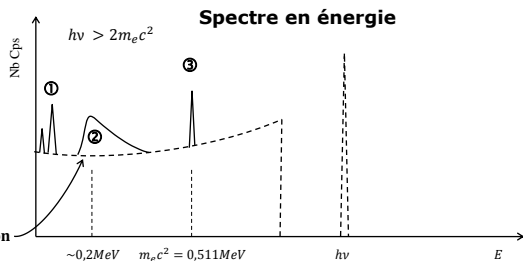
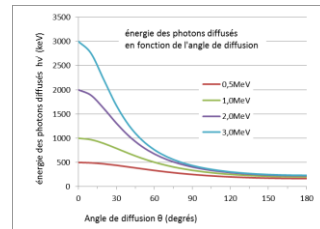
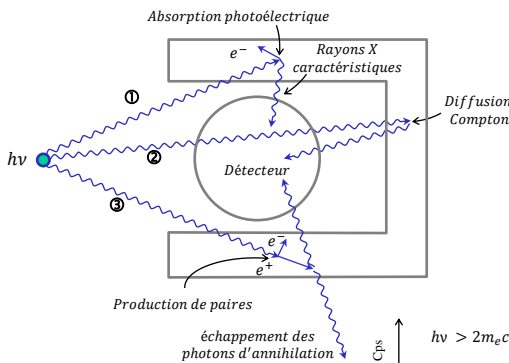
Spectres en énergie



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs Oléron 2015

Effet des matériaux environnants



Jean Peyré

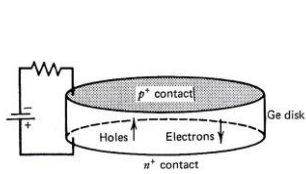
Ecole Technique de base des détecteurs Oléron 2015

VII_a - Les détecteurs "planaires"

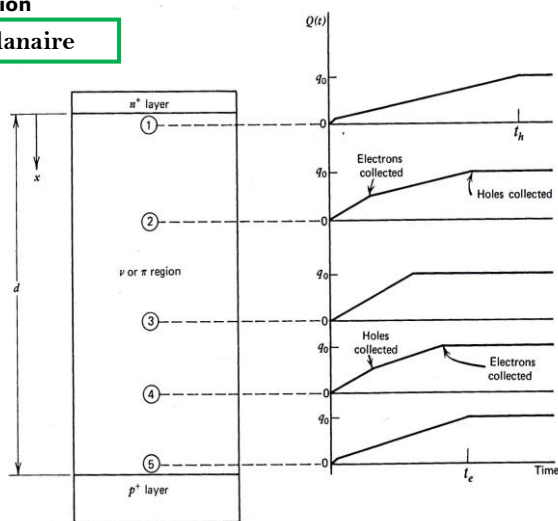
Détecteurs au Germanium

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

Détecteur planaire



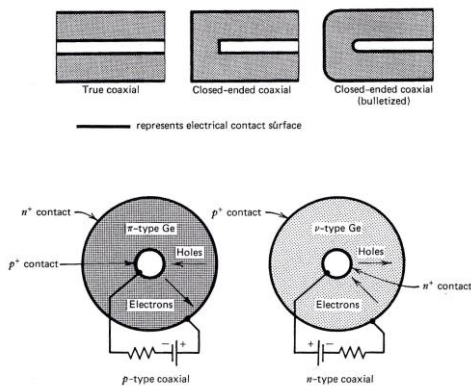
Extrait du livre de Knoll
(Modèle simplifié)



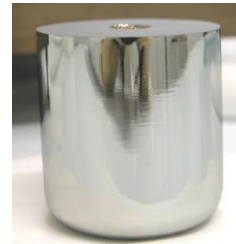
VII_b - Les détecteurs "coaxiaux"

Détecteurs au Germanium Détecteur coaxial

Détecteur coaxial



Détecteur de forte épaisseur
⇒ mesures γ sur une grande
gamme énergies



Cristal de Germanium

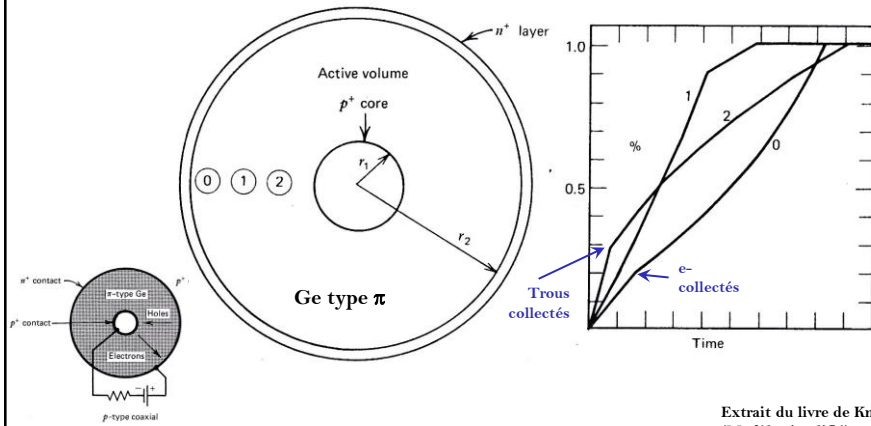
Figure 12-2 At the top are shown the three common shapes of large-volume coaxial detectors. Each represents a cross-sectional view through the axis of a cylindrical crystal. The outer electrode is extended over the flat front (left) surface in both closed-ended cases. Cross sections perpendicular to 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.

Extrait du livre de Knoll
(Modèle simplifié)

Détecteurs au Germanium

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

Détecteur coaxial

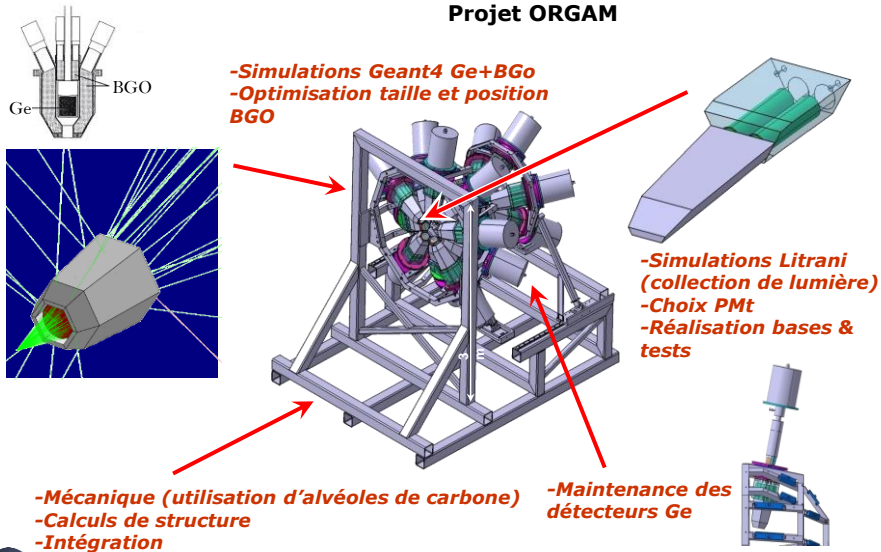


Extrait du livre de Knoll
(Modèle simplifié)

VII_c - "Anti-compton"

Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

Projet ORGAM

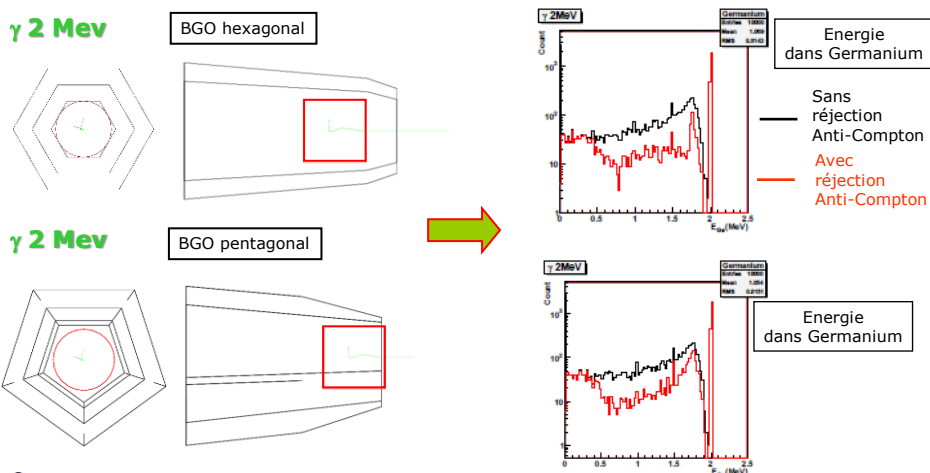


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

Détecteurs Ge et leurs "anti-compton"

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



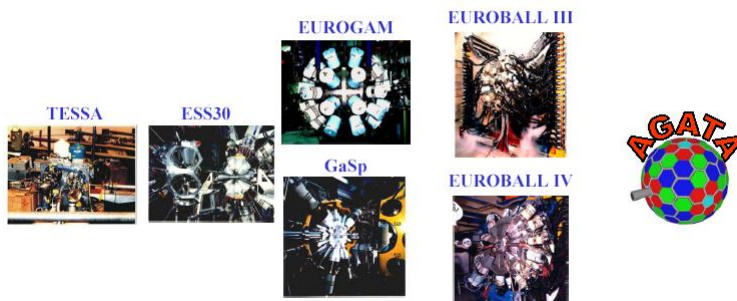
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

VII_d - "Le projet AGATA"

AGATA

Arrays from TESSA0 to AGATA



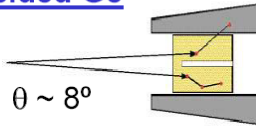
AGATA

Idea of γ -ray tracking

Compton Shielded Ge

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

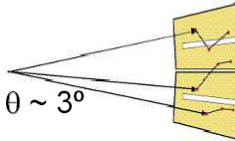
$\Omega \sim 40\%$



large opening angle means poor energy resolution at high recoil velocity

Ge Sphere

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

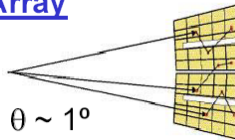


too many detectors are needed to avoid summing effects

Ge Tracking Array

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

$\Omega \sim 80\%$

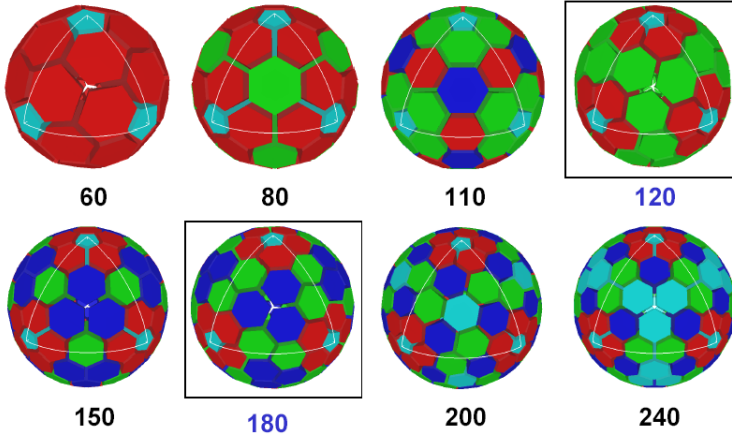


Combination of:

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

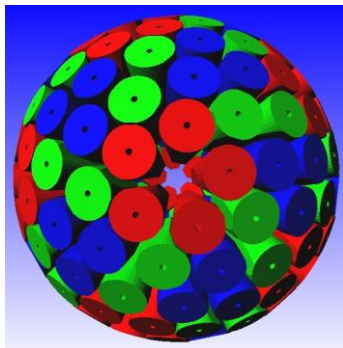
AGATA

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



AGATA

The 4π 180 detector Configuration



Ge crystals size:
length 90 mm
diameter 80 mm

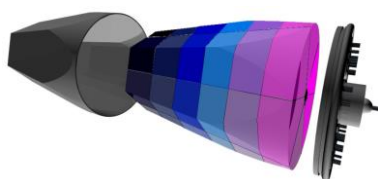
180 hexagonal crystals	3 shapes
60 triple-clusters	all equal
Inner radius (Ge)	23.1 cm
Amount of germanium	362 kg
Solid angle coverage	82 %
Singles rate	~50 kHz
6480 segments	
Efficiency:	43% ($M_r=1$) 28% ($M_r=30$)
Peak/Total:	58% ($M_r=1$) 49% ($M_r=30$)



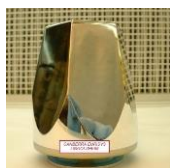
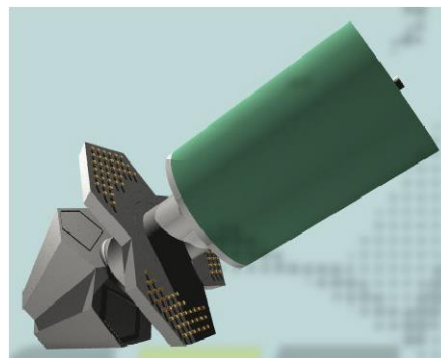
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

AGATA Detectors



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



3 encapsulated crystals
111 preamplifiers with cold FET



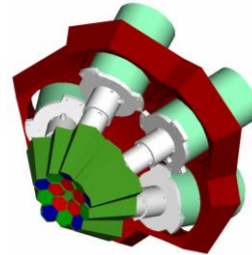
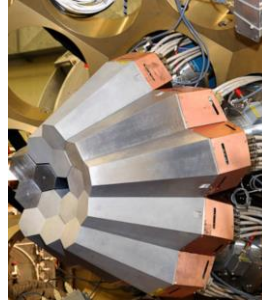
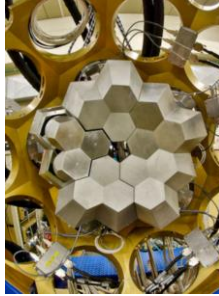
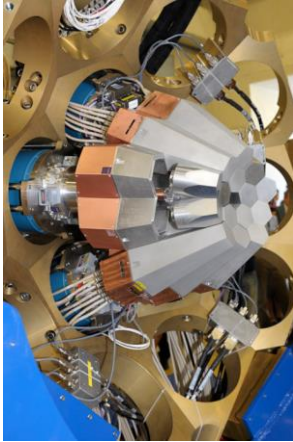
Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

AGATA: Advanced GAMMA Tracking Array



Spectromètre gamma 4 π constitué
uniquement de détecteurs Germanium.
DEMONSTRATEUR

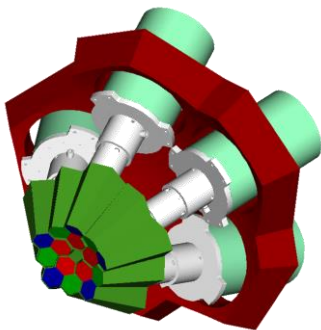


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015

AGATA

The First Step: The AGATA Demonstrator



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



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs
Oléron 2015