

0) Le plus vieux détecteur de particules au monde

I) Principes de détection

II) Combien de paires ?

III) Résolutions des détecteurs (lien avec les cours 1 et 2)

IV) Efficacité de détection

0) Quel est le plus vieux détecteur au monde ?

L'oeil

très sensible aux photons

bonne résolution spatiale

sensibilité miniale : 1000 photons/s

Energy discrimination (longueur d'onde)

vitesse limitée (data taking rate) 10 hz

s'adapte à la luminosité

I) Principes de détection :

Dessiner une particule (ligne droite) puis ajouter un milieu. C'est quoi ce milieu ? Si-Ge-gaz-liquide-scintillateur (case séparée)

**I.1) Cas des détecteurs à ionisation :**

On se concentre sur le dessin avec Si-Ge-gaz-liquide, que se passe-t-il ?

Étape 1 : perte d'énergie par **interaction** avec le milieu, cette perte d'énergie entraîne (étape 2) la création de paires d'ion et d'électron. Que se passe-t-il alors ? Si on ne fait rien, ce qui est le cas dans l'air, les ions et les électrons se recombinaient, fin de l'histoire. Comment fait-on pour éviter la **recombinaison** ? On applique un champ électrique à deux faces du volume pour forcer la **dérive** des ions et des électrons en sens opposés (étape 3). On collecte ensuite ces charges.

Etape 2 : la dérive vers les électrodes.

Dans un gaz la vitesse de dérive des ions et des électrons dépend de la pression :

$v = \mu_{\text{atm}} / P \cdot E$  où  $\mu$  est la mobilité, elle s'exprime en  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

| Ions in their own gas               | Mobility ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| He+                                 | 10.4                                                               |
| Ne+                                 | 4.14                                                               |
| Ar+                                 | 1.53                                                               |
| CH <sub>4</sub> +                   | 2.26                                                               |
| isoC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + | 0.61                                                               |

Pour les électrons, il n'y a pas de formalisme simple, il faut se référer à des mesures expérimentales. On peut retenir que la vitesse max sera de l'ordre de  $4 \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$ .

Dans les solides la mobilité ne dépend pas de la pression, on a simplement  $v_e = -\mu_e E$  et  $v_{\text{ion}} = \mu_h E$

|    |       | Mobility ( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |                  |
|----|-------|--------------------------------------------------------------------|------------------|
|    |       | 300K                                                               | 77K              |
| Si | e-    | 1350                                                               | $2.1 \cdot 10^4$ |
|    | holes | 480                                                                | $1.1 \cdot 10^4$ |
| Ge | e-    | 3900                                                               | $3.6 \cdot 10^4$ |
|    | holes | 1900                                                               | $4.2 \cdot 10^4$ |

Ces valeurs peuvent être considérées justes tant que le champ électrique ne dépasse pas quelques milliers de volts, ce qui est quasiment toujours le cas pour les applications de détection.

Une question ici. Une charge ou plusieurs charges se déplacent vers le potentiel pour la lecture. A quel moment, est-ce que notre électronique de lecture « voit » les charges ?

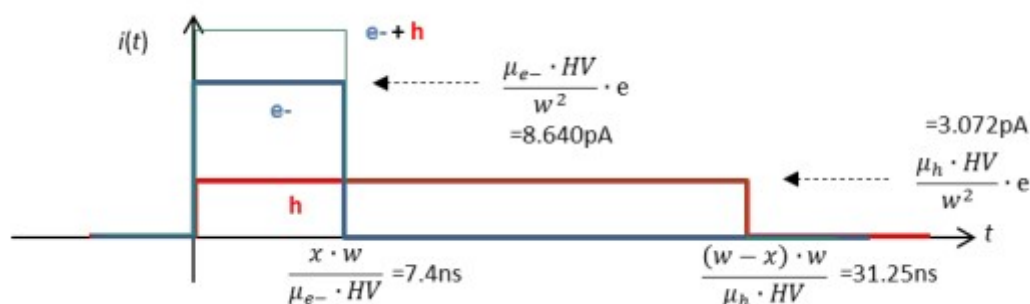
Tout le temps en fait, c'est le déplacement des charges qui crée le signal, le courant induit sur les électrodes peut être calculé par le théorème de Shockley Ramo qui permet d'exprimer le courant  $i$  sur une électrode en fonction du champ électrique  $E$ , de la vitesse de dérive de l'électron ou de l'ion et de sa charge  $q$  :

$i(t) = -q(t) \cdot v \cdot E^* / 1V$ . où  $E^*$  est le champ électrique virtuel si :

- o on plaçait l'électrode  $k$  au potentiel 1V,
- o toutes les autres électrodes étant à la masse (0V),
- o et on enlevait toutes les charges présentes dans le détecteur

**Application très très directe :** que se passe-t-il pour une paire électron-trou créée à une position donnée d'un détecteur plan infini de type PIN (P, Intrinsèque, N : pas de charge d'espace au sein du détecteur) à température ambiante. On veut calculer le courant injecté dans l'électrode (2). On prendra  $HV=100V$ ,  $w=500\mu\text{m}$  (deux plans distants de  $500 \mu\text{m}$ ).

On peut représenter la forme du signal, qui je vous le rappelle est valide pour tous les détecteurs de type Si, Ge, gazeux.



(l'exemple vient du cours de Jean-Marc Fontbonne pour l'école Joliot Curie 2015)

Pour le champ virtuel  $E^*$ , au lieu de HV, on choisit 1V, donc le champ  $E^* = 1V/w$ .

On place maintenant une paire e-/h à la position  $x$  ( $=200\mu m$ , référencée par rapport à l'électrode 1).

L'électron va aller vers l'électrode 1 et le trou vers l'électrode 2. Dans l'étape 3 on calcule la trajectoire de l'électron et du trou

C'est beaucoup des picoA à votre avis ? Non. Il va falloir plus de courant pour pouvoir le détecter dans un système standard. C'est pour ça qu'il y a de l'amplification dans les détecteurs.

Donc on vient de voir, dans le cadre général, comment se forme le signal sur l'électrode du détecteur gazeux ou à scintillation.

## I.2) Cas des détecteurs à scintillation :

On revient à nos dessins initiaux. On se concentre désormais sur le dessin scintillateur. Que se passe-t-il dans ce cas ? Cette fois la particule excite les noyaux du matériau.

Un scintillateur est un matériau qui émet de la lumière, donc des photons, lorsqu'il est traversé par une radiation. La radiation ionisante passe dans le matériau qui émet alors de la lumière dans toutes les directions. La lumière est due aux propriétés atomiques du matériau. Dans quelle direction est émise cette lumière ? La lumière est émise dans toutes les directions.

Si on compte le nombre de photons émis, on peut déterminer l'énergie déposée par la radiation. On appelle cette quantité de lumière produite le Light Yield, noté LY. Le Light Yield est proportionnel à la quantité d'énergie déposée. On a donc  $LY = \alpha \times \text{énergie déposée}$ , où  $\alpha$  est une constante, notée alpha. Un ordre de grandeur à retenir : pour la majorité des scintillateurs,  $\alpha \approx 10\,000$  photons/MeV. Certains scintillateurs ont des LY de 50 000 et d'autres de 100.

Attention ! L'énergie déposée ce n'est pas l'énergie de la particule ! Plus l'énergie de la particule est grande, moins elle va déposer d'énergie dans le scintillateur. Si on prend un muon de 20 MeV et un autre muon de 200 MeV, le muon de 20 MeV déposera plus d'énergie dans le scintillateur que celui de 200 MeV. On a donc  $E_{\text{dep}} = \beta/E$ . D'accord. Que fait-on ensuite de cette lumière ?

Alors au départ, rien. Elle était observée à l'œil nu, il fallait donc qu'elle soit émise dans le visible. Ensuite, on a rapidement utilisé des moyens électroniques. Le photon créé lors par la désexcitation est guidé vers une fenêtre, appelée photocathode, qui convertit le photon en électron avec une certaine efficacité, appelée efficacité quantique et notée QE. Selon la géométrie du scintillateur et de la fenêtre de conversion, tous les photons n'atteignent pas la fenêtre. Grâce au champ électrique présent, l'électron est alors accéléré vers une dynode. L'accélération est telle que lorsqu'il vient toucher la dynode, il arrache un certain nombre d'électrons à cette dernière. Ces électrons sont alors accélérés jusqu'à la dynode suivante de laquelle ils arrachent chacun plusieurs électrons et ainsi de suite jusqu'à l'anode de lecture. Le facteur de multiplication entre l'électron initial et ceux qui arrivent à l'anode est appelé gain, et noté G. Le gain d'un PMT peut facilement atteindre  $10^5$ - $10^6$ . **Dessin d'un PMT**

La formule du nombre d'électrons collectés devient ainsi :  $N_{\text{collect}} \text{ électrons} = E_{\text{déposée}} \times LY \times \text{Geom} \times QE \times G$ . Le gain des PMT peut être suffisant pour que le signal soit lu directement sans recourir à une électronique spécifique mais ce n'est pas toujours le cas.

## II) Combien de paires sont créées ?

### 1) Dans un gaz

Le gaz choisi doit maximiser la création de paire électron-ion. Pourquoi ? On peut montrer que la résolution en énergie du détecteur est inversement proportionnelle au nombre de paire :  $R = 2,35 / \sqrt{N}$  où  $N$  est le nombre de paires créées donc plus il y a de paires, meilleure est la résolution. Donc on ne va surtout pas choisir He, Ne, Ar, Kr, Xe... n'est-ce pas ? En fait si car une fois créé, l'électron doit encore voyager vers l'électrode, il faut donc qu'il ne soit pas capturé par les autres atomes du gaz, donc que l'attachement électronique soit faible, ce qui est le cas pour les gaz nobles. A partir du gaz choisi et de l'énergie d'ionisation moyenne, il est possible de déterminer le nombre de paires créés.

| Gaz | Wi (eV) |
|-----|---------|
|-----|---------|

|    |    |
|----|----|
| Ne | 30 |
|----|----|

|    |    |
|----|----|
| Ar | 25 |
|----|----|

|    |    |
|----|----|
| Xe | 22 |
|----|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| CH <sub>4</sub> | 30 |
|-----------------|----|

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 26 |
|-------------------------------|----|

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 26 |
|---------------------------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| CO <sub>2</sub> | 34 |
|-----------------|----|

|                 |    |
|-----------------|----|
| CF <sub>4</sub> | 54 |
|-----------------|----|

#### Exercice d'application très très directe :

Combien d'électrons primaires sont créés par le passage d'une particule qui perd 300 keV dans de l'Ar ? Dans de l'hélium ? Et quelle est la résolution attendue ?

D'où  $N = E/w$ , soit  $R = 2,35 * \sqrt{w/E}$  et bien ça c'est faux !

En effet, la création de porteur de charge ou de photons dans un scintillateur n'est pas indépendante. Il faut appliquer un facteur de correction, appelé facteur de Fano, noté  $F$ .

$$R = 2,35 * \sqrt{Fw/E}$$

Où  $F \cong 1$  détecteurs à scintillation

$F = 0,2$  dans gas Ar + 10 % CH<sub>4</sub>, Argon 0,17

Et l'énergie moyenne de création de paire :

$w$  Ar-26,2, Xe 21,5,

### 2) Dans un semi-conducteur :

Si 3,6, Ge 2,85 eV

$F = 0,12$  Si, 0,13 Ge, 0,08 Dimand

Quand le facteur de Fano est inférieur à 1, cela signifie la résolution réelle est meilleure que celle attendue par des ionisations qui seraient totalement indépendantes.

**Exercice d'application très très directe :**

Calculer la résolution attendue pour un détecteur Germanium pour un photon de 662 keV qui dépose toute son énergie.

$R = 2,35 * \sqrt{0,13 * 2,85 / 662e3} = 9e-4 = 0,09 \% \text{ soit } 0,6 \text{ keV}$ . C'est la limite inférieure. Il est très difficile d'obtenir cette résolution exactement puisqu'il y a ensuite les incertitudes liées à l'électronique et au couplage avec le détecteur.

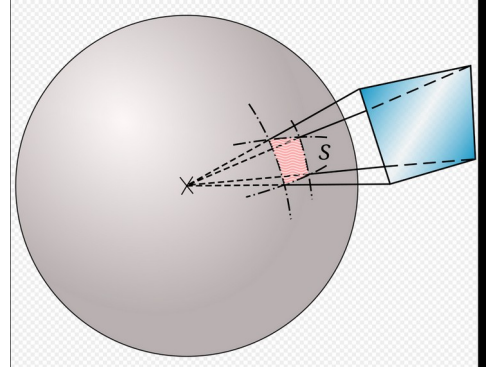
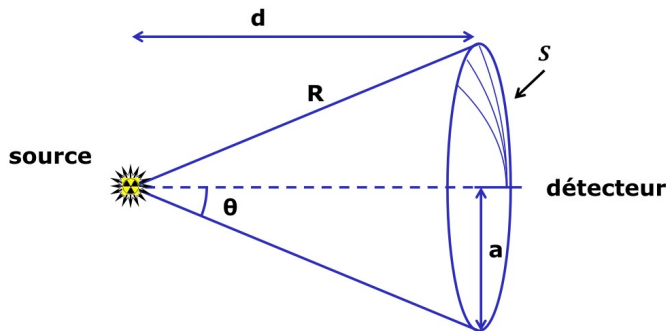
## IV) Efficacité de détection :

### 1) Notion d'angle solide

Lorsque l'on considère des objets en 3 dimensions, il faut utiliser l'angle solide à la place de l'angle plan ou bidimensionnel.

Dessiner angle en 2D

Dessiner angle en 3D



L'angle solide  $\Omega$  est défini par  $\Omega = S(\text{surface en m}^2)/R^2$

La première étape de détermination de l'efficacité d'un système de détection est de déterminer le nombre de particules ayant effectivement traversées le détecteur. Il faut donc déterminer la zone d'où les particules proviennent et celle du détecteur. D'où l'importance de bien déterminer l'angle solide.

Cas particulier dans le cas où la surface  $S$  est délimitée par un cercle et la source ponctuelle.

Dans ce cas  $\Omega = S/R^2 = 2\pi * (1 - \cos \theta) = 2\pi * (1 - d/R) = 2\pi * (1 - d/\sqrt{d^2 + a^2})$

### 2) Efficacités :

Pourquoi différentes efficacités ?

Efficacité géométrique  $\epsilon_{\text{géom}} = \text{nombre total émis} / N_{\text{dans dét}} = \Omega_{\text{géom}} / \Omega_{\text{tot}}$

$$= 2\pi * (1 - d/\sqrt{d^2 + a^2}) / 4\pi$$

$$= (1/2) (1 - d/\sqrt{d^2 + a^2})$$

Efficacité intrinsèque du détecteur qui dépend de : énergie, type de particule, type de détecteur, seuil de détection, électronique...

On a donc efficacité =  $\epsilon_{\text{géom}} \times \epsilon_{\text{intrinsèque}}$ .

Si une source émet  $N$  particules dans tous les espaces, il y en aura donc

$N' = N * \epsilon_{\text{géom}}$  dans le détecteur

et  $N'' = N \epsilon_{\text{géom}} * \epsilon_{\text{intrinsèque}}$  dans le détecteur

Question : comment évalue-t-on l'efficacité d'un détecteur ?