
Présentation du cosmodétecteur

a. Description générale



Cosmodétecteur en fonctionnement relié à l'ordinateur. Crédit : Sciences à l'Ecole.

Le cosmodétecteur est composé de 4 parties :

- Les raquettes de scintillateur : détecte le passage éventuel des muons μ^\pm
- le photomultiplicateur (PM) : amplifie le signal détecté par le scintillateur;
- la partie électronique : transforme le signal analogique reçu à la sortie du PM en signal numérique et discrimine les signaux trop faibles (fixé par l'expérimentateur)
- le logiciel

b. Les scintillateurs

Les scintillateurs sont, en règle générale, constitués par un milieu solide transparent (organique tels les plastiques ou inorganique tels ceux aux cristaux de NaI(Tl)) susceptible d'émettre des rayonnements de fluorescence¹ et de phosphorescence² après excitation par une particule chargée (dans notre cas, un muon μ^\pm mais un scintillateur peut tout à fait détecter un électron ou n'importe quelle autre particule chargée). Selon les matériaux utilisés pour le scintillateur, on aura soit de la fluorescence, soit de la phosphorescence.

Le scintillateur du cosmodétecteur est de type plastique (fait de matière organique) et c'est le phénomène de fluorescence qui est très largement prépondérant : les molécules excitées se dés excitent très rapidement par émission d'un photon lumineux. Le mécanisme de fluorescence est associé aux états excités des molécules. La scintillation est basée sur les électrons π des liaisons carbone-carbone des molécules. La lumière émise couvre généralement un spectre large dans l'U.V. et le visible. Ces photons de fluorescence issus de

¹ On parle de fluorescence lorsque l'émission de lumière est immédiate (dans un temps de l'ordre de 1 ns à 1 μ s) et indépendante de la température.

² La phosphorescence correspond à une émission de lumière sur une plus longue période (entre 1 μ s et 1 mn) et qui dépend de la température.

la désexcitation du milieu solide du scintillateur sont ensuite détectés par un photomultiplicateur.



Photo du scintillateur utilisé pour la mesure du temps de vie du muon (protégé par un plastique). Crédit : Sciences à l'Ecole.

Les paramètres utiles d'un scintillateur sont les suivants:

- efficacité de scintillation: c'est la quantité d'énergie nécessaire pour créer un photon de scintillation. Par exemple, NaI(Tl) : 25 eV, anthracène : 60 eV, plastique : 100 eV;
- spectre d'émission de lumière: il faut s'assurer que la longueur d'onde d'émission est adaptée à la fenêtre d'entrée du récepteur de la chaîne de mesure (dans notre cas la photocathode du photomultiplicateur (PM)) ;
- temps de décroissance de la scintillation ;
- pouvoir d'absorption des rayonnements.

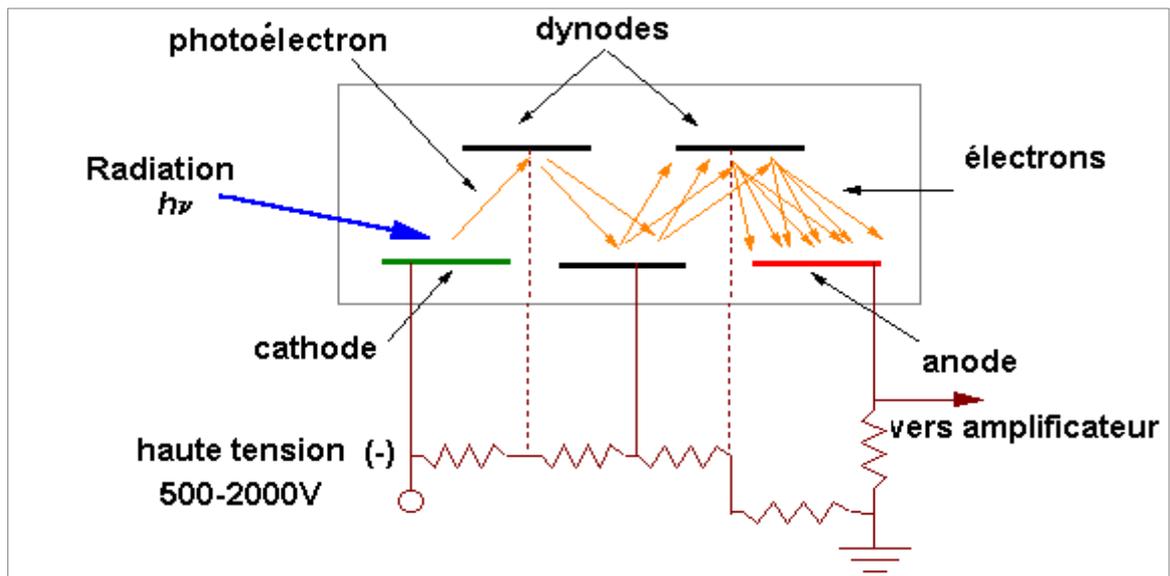
Les scintillateurs plastiques, faits de matériaux organiques, ont un avantage par rapport à des scintillateurs à cristaux – malgré leur efficacité limitée –, ils ont un temps caractéristique très petit (de l'ordre de la nano seconde $\sim 10^{-9}$ s) de sorte que l'on peut compter les événements venant de flux intense de particules chargées. Le scintillateur plastique, grâce à son temps de réponse rapide, est donc tout à fait adapté à des mesures de coïncidences* ou de temps de vie.

c. Les photomultiplicateurs

Les photons issus du scintillateur arrivent sur une photocathode* et donnent naissance à des photoélectrons ce qui permet de transformer le signal lumineux en signal électrique. Cependant, l'intensité électrique issue de la photocathode est très petite (de l'ordre de 10^{-14} A) et n'est donc pas détectable en l'état : il faut amplifier ce signal.



Photomultiplicateurs utilisés dans le cosmodétecteur. Crédit : Sciences à l'Ecole



Principe de fonctionnement d'un photomultiplicateur.
 Source : Patrick Kohl <http://patrick.kohl.pagesperso-orange.fr>

Dans un tube vidé d'air sont donc enfermées une douzaine d'électrodes régulièrement disposées et que l'on porte à des potentiels régulièrement croissants (≈ 100 V entre deux électrodes consécutives). La première est donc une photocathode, à la tension la plus basse, qui sous l'action du faisceau lumineux issu de la scintillation émet des photoélectrons. Ceux-ci sont alors attirés par la deuxième électrode et vont la frapper avec une énergie cinétique importante: une partie de cette énergie est communiquée à certains électrons libres du métal de l'électrode, et leur fournit ainsi l'énergie de sortie W_s nécessaire pour s'arracher du métal.

Chacun des photoélectrons incidents provoque ainsi la sortie de 3 ou 4 autres électrons; c'est ce qu'on appelle le phénomène d'émission secondaire. Les électrons extraits de la deuxième électrode sont alors attirés par la troisième où ils provoquent à leur tour le phénomène d'émission secondaire. Le nombre d'électrons se trouve ainsi multiplié de proche en proche; et le courant I recueilli par la dernière électrode est considérablement amplifié par rapport au faible courant de la photocathode.

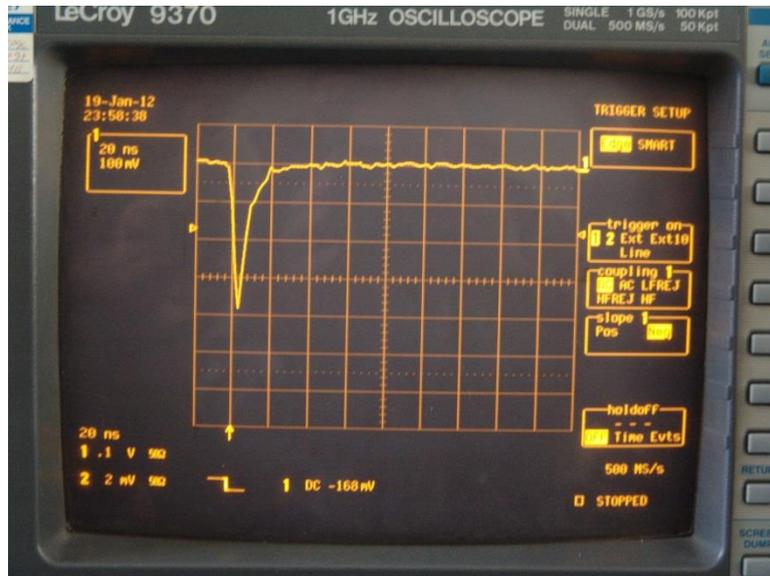
Ainsi, pour 12 électrodes, il y a 10 émissions secondaires qui vont avoir lieu, donc si chaque électron à chaque émission secondaire provoque la sortie de 4 électrons, le gain de ce dispositif est de $4^{10} \approx 10^6$, c'est-à-dire qu'un seul photoélectron provoque l'arrivée d'un million d'électrons sur la dernière électrode. Ce gain est assez important pour permettre la détection individuelle des photoélectrons. Un million d'électrons donne une charge électrique:

$$Q = -10^{-6}e = -1,6 \cdot 10^{-13}C$$

d. Electronique du détecteur

La chaîne de détection est constituée :

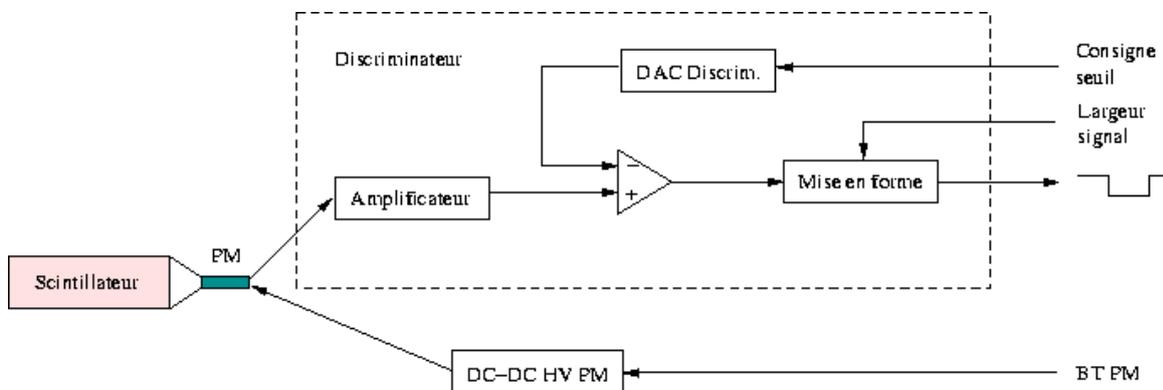
- d'un scintillateur qui réagit au passage d'une particule en émettant un signal lumineux,
- d'un photomultiplicateur, qui transforme ce signal lumineux en impulsion électrique,
- d'un module « discriminateur » qui sélectionne et transforme ces impulsions en signaux calibrés standardisés,
- d'un module de coïncidence qui sélectionne les signaux calibrés arrivant en même temps de plusieurs sources.



Allure du signal de sortie des photomultiplicateurs. Crédit : P. Wild.

i. Le discriminateur

Le discriminateur a pour fonction de s'affranchir des signaux en dessous d'un certain seuil et transforme le signal analogique du photomultiplicateur en signal carré d'amplitude constante et de durée réglable quelque soit le signal à partir du moment où celui-ci passe le seuil de discrimination. Le rectangle de gauche représente les commandes de ce discriminateur. On peut commander le seuil de discrimination et la durée du signal de sortie.

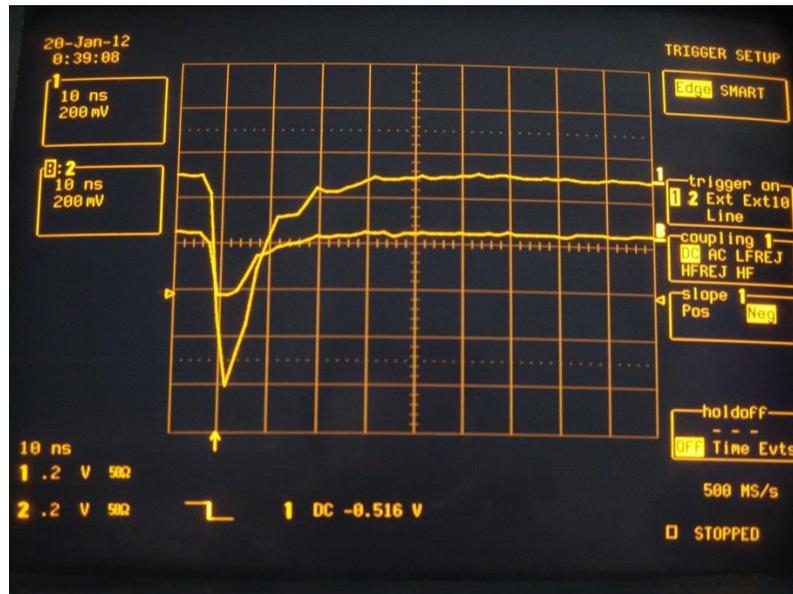


L'alimentation haute tension du photomultiplicateur est assurée par l'intermédiaire d'une alimentation basse tension et d'un convertisseur DC-DC.

ii. Principe de la coïncidence

Chaque PM du cosmodétecteur a un bruit de fond thermique aléatoire important, qui se traduit par l'émission de pulses électriques à sa sortie même en l'absence de signal lumineux (bruit d'obscurité). Ce bruit de fond a des amplitudes aléatoires et peut simuler le signal produit par le passage d'une particule dans le scintillateur. La fréquence de ce bruit de fond est en général beaucoup plus élevée que celle du signal et l'occulte complètement. Il est donc impossible de détecter le passage d'une particule à l'aide d'un seul détecteur élémentaire. On résout cette difficulté en associant deux ou plusieurs scintillateurs disposés de façon à ce que la particule les traverse tous. Le muon, se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, crée un signal dans chacun des scintillateurs dans un intervalle de temps de l'ordre de

quelques nanosecondes. Au contraire les bruits de fond émis par les photomultiplicateurs sont complètement décorrélés. En utilisant une fenêtre de détection de 100ns, nous sommes certains de prendre en compte les signaux générés par le muon tout en ayant une probabilité faible que les signaux de bruits de fond (coïncidence fortuite) se produisent dans cette fenêtre.



Signal en coïncidence de deux PMs. Crédit : P. Wild.

Le taux de coïncidence fortuite N se calcule facilement :

- Soit n_1 : nombre de coups par seconde pour le détecteur 1
- Soit n_2 : nombre de coups par seconde pour le détecteur 2
- Soit T : durée de la fenêtre de coïncidence (sec)

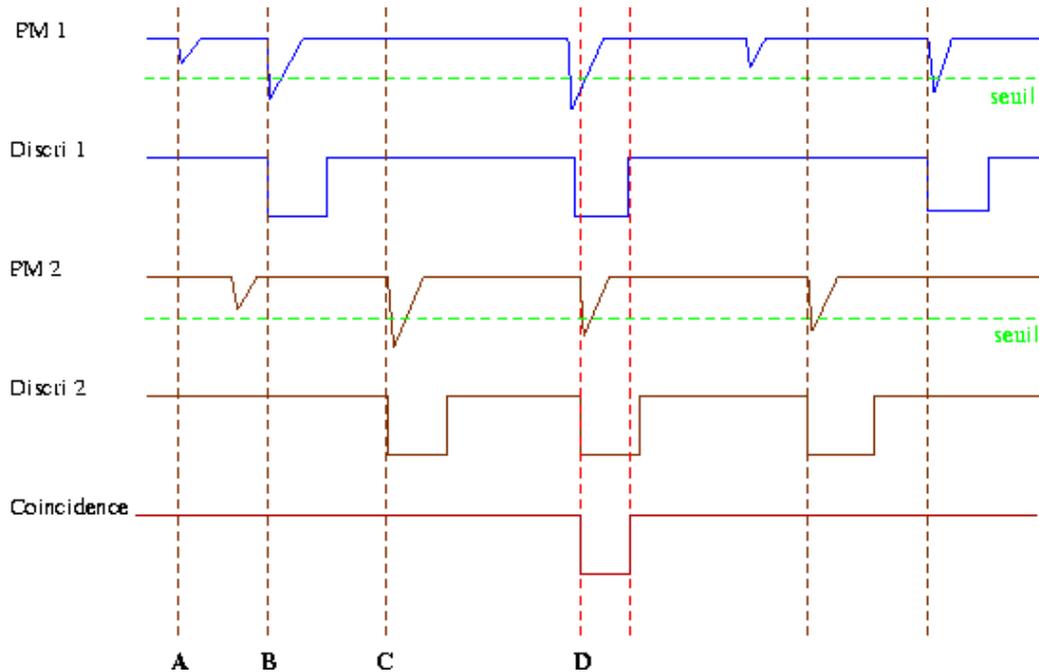
Alors :

$$N(\text{coups/sec}) = n_1 \cdot n_2 \cdot T$$

Si on prend un ordre de grandeur de 100 coups/sec pour les deux PMs et une durée de fenêtrage de 100 ns, on obtient un taux de coïncidence fortuite de 10^{-3} coup/s, totalement négligeable par rapport un taux de comptage de muon de 1 coups/s. En revanche, avec un taux de comptage de un coup toutes les 5 min (0,0033 coups/s), on aurait alors une coïncidence fortuite sur 4 déclenchements parasites sur les 5 minutes... plus du tout négligeable !

On ne peut donc détecter le passage d'un muon que si l'on dispose d'au moins deux détecteurs élémentaires et d'une logique de coïncidence temporelle des signaux de ces détecteurs élémentaires.

Exemple des différentes configurations possibles



Cas A : bruit dans le PM1 en dessous du seuil de détection : le discriminateur ne répond pas.

Cas B : signal au-dessus du seuil dans le PM1, rien dans le PM2 : pas de coïncidence.

Cas C : signal au-dessus du seuil dans le PM2, rien dans le PM1 : pas de coïncidence.

Cas D : signaux au-dessus du seuil dans les 2 PM et compatibles en temps, c'est un muon.

Remarque : dans les cas B et C, on ne peut pas savoir si le signal ayant déclenché le PM est un bruit de fond du PM ou un vrai muon dont la trajectoire ne rencontrait pas l'autre scintillateur.

Electronique intégrée de la roue cosmique :

Dans le cas de l'électronique intégrée livrée avec la roue cosmique, dans un souci de compacité et de compatibilité avec les techniques utilisés actuellement en physique des particules, on a choisi de numériser les signaux dès la sortie des discriminateurs et d'effectuer ensuite la coïncidence sur les données enregistrées. Le schéma de fonctionnement est toujours le même, mais la coïncidence électronique est remplacée par un ET logique dans le processeur d'acquisition de données.

Dans le schéma suivant, on retrouve les impulsions à la sortie des discriminateurs, la numérisation des 2 voies et le ET logique entre les 2 sorties qui donne la coïncidence.

