

Etude de la détection de muons

Romain COHET - Alexandre FAURE - Nicolas FOY

7 février 2011

Résumé

Ce rapport est issu des mesures et travaux effectués à l'Université Montpellier II dans le cadre des travaux pratiques de physique des particules pour le diplôme de Master 2 Cosmos, Champs et Particules pendant les mois de janvier et février 2011.

Table des matières

1	Les muons	3
1.1	Les rayons cosmiques	3
1.2	Caractéristiques des muons	3
1.2.1	Application	4
2	Matériel	5
2.1	Photomultiplicateur	5
2.2	Scintillateur	7
2.3	Raquettes	8
3	Protocole expérimental	9
3.1	Caractéristiques du PM	9
3.2	Détection des muons	10
4	Caractérisation du gain du photo-multiplicateur	11
4.1	Programmes utilisés	11
4.2	Résultats des mesures	11
5	Analyses	12
6	Conclusion	13
7	Annexes	14
8	Bibliographie	15

Chapitre 1

Les muons

Nous détaillerons dans cette partie introductives quelques notions basiques en physique des particules afin de cerner le but du travail réalisé.

1.1 Les rayons cosmiques

Les *rayons cosmiques* sont des particules subatomiques chargées provenant de l'espace, entrant en collision avec la haute atmosphère. Elles produisent des particules dites *secondaires* qui arriveront, à leur tour, jusqu'au sol.

Leur particularité est également d'arriver au sol individuellement et non sous forme de *paquet* ou de *faisceau* comme c'est le cas dans les accélérateurs de particules par exemple.

La plupart des rayons cosmiques arrivant dans la haute-atmosphère sont les protons à 89%, 10% de noyaux d'Hélium et 1% d'éléments plus lourds. Ces particules entrent en collision avec les molécules de l'atmosphère et provoquent de multiples ionisation donnant naissance à des particules secondaires. Ces collisions sont appelées *gerbes*. De ces gerbes hadroniques va résulter la production des particules qui nous intéressent dans notre études, les *muons*.

1.2 Caractéristiques des muons

Le *muon* est une particule élémentaire du modèle standard possédant une charge négative et un spin $\frac{1}{2}$; elle appartient à la catégorie des *fermions*.

Les muons ont une masse de $105.7 MeV.c^{-2}$ soit 200 fois la masse de l'électron. Ils possèdent également la propriété de pénétrer la matière de manière plus profonde que les électrons. Leur masse étant plus importante que celle des électrons, leur ralentissement par *brehmstrahlung* s'en trouve d'autant plus difficile. Le libre parcours moyen des muons est donc supérieur à celui des électrons.

1.2.1 Application

Dans notre cas pratique, nous voulons détecter des muons ayant effectivement traversé la haute atmosphère terrestre. Sachant que l'épaisseur de cette atmosphère est d'environ $1000g.cm^{-2}$, les muons vont perdre environ 2 GeV par ionisation après l'avoir traversée.

Il faut cependant noter que déjà à 15 000 mètres environ, nous notons une épaisseur de $175g.cm^{-2}$. Le muon perd donc déjà environ 350 MeV. C'est néanmoins dès cette étape que les muons secondaires sont générés¹.

Les muons arrivent au niveau de la mer avec un flux moyen typique de $1cm^{-2}.m^{-1}$ ce qui correspond à environ la moitié de la radiation totale naturelle de fond pour ces particules.

Le temps de vie moyen des muons mesuré est de $2.2 \mu s$. Dès lors, à la vitesse de la lumière, cela donne une distance d'existence typique de $660 m^2$.

1. N'oublions pas que nous effectuons nos mesures en laboratoire et qu'il faudrait en théorie prendre en compte les interactions avec la structure même du bâtiment.

2. Distance et temps qui nous paraissent évidemment bien plus longs tels que nous les percevons en vertu de la théorie de la relativité restreinte.

Chapitre 2

Matériel

Dans cette partie du rapport, nous détaillerons le principe de fonctionnement des deux composants majeurs utilisés lors de ces travaux pratiques : le photomultiplicateur et les raquettes scintillantes auxquelles est rattaché un photomultiplicateur pour chacune d'entre elle.

2.1 Photomultiplicateur

Le Photomultiplicateur (ou *PM*), est un dispositif qui permet de produire un courant électrique lorsque celui-ci détecte des photons.

Le schéma de ce dispositif couplé à un scintillateur¹ est représenté sur la figure 2.1.

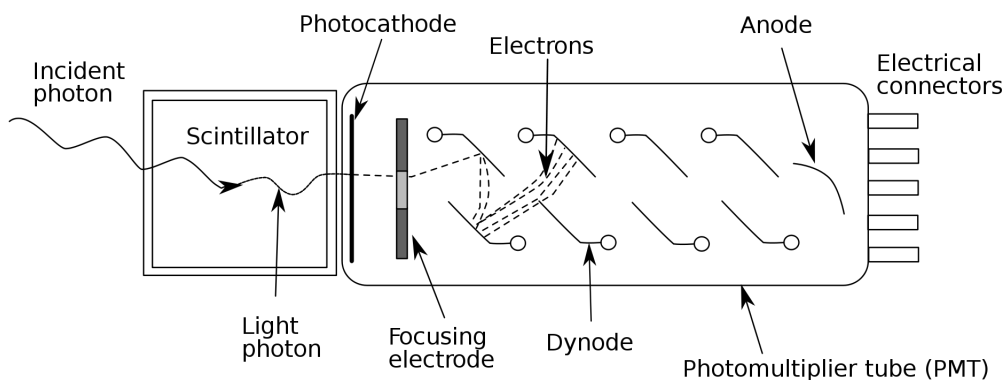


FIGURE 2.1 – Schéma d'un photomultiplicateur couplé à un scintillateur.

Il est composé d'une tube principal dans lequel règne un vide aussi parfait que possible afin de perturber le moins possible la circulation des électrons dans le dispositif.

1. Nous aborderons la notion de milieu scintillant dans la partie suivante.

En entrée du dispositif se trouve une *photocathode*² qui va permettre la détection des photons incidents. En effet, le principe de fonctionnement est basé sur l'effet-photoélectrique ; c'est à dire que lorsqu'un photon traverse le matériau de la photocathode, celui-ci éjecte un (ou plusieurs) électrons. Ces électrons vont ensuite être envoyés dans le tube à l'aide d'une électrode convergente.

La seconde partie cruciale du PM est ce que nous pourrions appeler, le multiplicateur d'électrons que l'on retrouve par un agencement de multiples électrodes que l'on appelle des *dynodes*. Chacune des dynodes sont soumises à un potentiel électrique positif, qui croît pour chaque dynode lorsque l'électron les rencontre. Ainsi, les électrons qui avaient à l'origine, une énergie³ $h\nu - \Phi$ en sortie de la photocathode, se retrouvent avec une énergie beaucoup plus importante en sortie. Le principe physique de l'effet photoélectrique est résumé par soucis de clarté, avec la figure 2.2

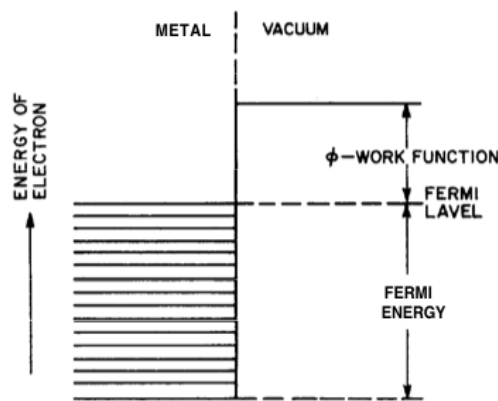


FIGURE 2.2 – Principe physique de l'effet photoélectrique avec le niveau de Fermi et l'énergie seuil Φ . Source : *Photomultiplier Handbook*

De plus, lorsque les électrons heurtent les dynodes, il se crée une "avalanche d'électrons" secondaires, qui sont les électrons réellement détectés en sortie du dispositif. A chaque étape de rencontre de dynode, le nombre d'électrons secondaires en sortie est supérieur.

Typiquement, ces photomultiplicateurs sont sensibles de l'ultraviolet à l'infrarouge proche et le temps de réponse est de l'ordre de la nanoseconde. Ainsi, à partir de la détection d'un seul photon par le dispositif, le PM, alimenté par une source de haute tension⁴ est en mesure de générer un courant que l'on peut facilement mesurer, même si un seul électron est détecté par l'appareil.

2. Il existe plusieurs dizaines de matériaux différents dont l'AG-O-Cs ou encore le GaAs :Cs. Le matériau constituant les photocathodes de nos PM est le

3. Avec la variable Φ qui correspond au potentiel à appliquer à l'électron pour lui permettre d'être arraché de la surface du métal.

4. La haute-tension sera notée HV pour *High-Voltage* dans la suite du rapport.

2.2 Scintillateur

Le *scintillateur* ou *milieu scintillant* désigne un instrument qui est composé d'un matériau émettant des photons suite à un dépôt d'énergie par interaction rayonnement-matière.

De façon plus concrète, une particule d'énergie donnée qui rencontre le scintillateur dépose une partie de son énergie incidente dans le matériau en excitant les molécules de celui-ci. Les électrons passent donc à un état d'énergie supérieur et ré-emettent cette énergie par desexcitation spontanée sous forme de rayonnement. Ce principe physique est résumé par la figure 2.3.

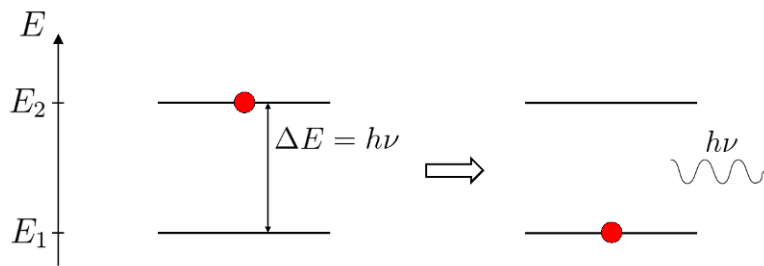


FIGURE 2.3 – Principe physique de la desexcitation électronique spontanée. Source : *media4.obspm.fr*

Il existe deux grandes familles de scintillateurs :

- **Scintillateurs organiques** composé de molécules organiques que l'on retrouve sous forme de cristaux, de liquides ou de plastique.
En ce qui concerne la physique qui intervient lors de la propagation de l'énergie dans le matériau organique, celle-ci fait intervenir des transitions énergétiques via les électrons de valence des molécules
- **Scintillateurs inorganiques** composé d'un matériau minéral, le plus souvent sous forme cristalline. Nous noterons aussi l'existence de scintillateur gazeux⁵ ou à base de verre.
Dans ce cas, la propagation d'énergie est expliquée par la théorie des bandes des solides cristallins proposée par Bloch. Cette physique entre alors en jeu et il faut considérer les perturbations qui entrent en jeu dues aux interactions atomes et ions qui forment notre cristal. La structure de conduction du cristal est donc ainsi modifiée (i.e. modification de la bande de valence et de l'énergie de *gap* de notre matériau scintillant).

L'étape clé de la détection de la particule chargée par le matériau scintillant est le dépôt d'énergie de la particule incidente. En physique des particules, une particule chargée qui traverse un matériau va ioniser les atomes ou les molécules qu'elle rencontre sur son parcours.

On définit alors le *pouvoir d'arrêt* d'un matériau qui définit la perte moyenne d'énergie de la particule par unité de longueur (et s'exprime en $MeV.cm^{-1}$) lorsqu'elle le traversera.

5. Les scintillateurs gazeux sont composés le plus souvent d'azote ou de gaz nobles (He, Ar, Kr, Xe)

Cependant, dans le cas de particules relativistes, comme les muons que nous cherchons à caractériser dans notre étude, le facteur de Lorentz étant très important implique dans les calculs que nous sommes au *minimum de ionisation* de la particule, ou *MIP*. C'est à dire que la particule va toujours déposer la même quantité d'énergie lorsqu'elle traversera le matériau, quel qu'il soit : $2MeV.g^{-1}.cm^2$.

2.3 Raquettes

Lors de cet étude, nous avons à dispositions quatre *raquettes*. Comme leur dénomination l'indique, celles-ci sont constituées d'une partie *scintillateur* qui est le détecteur primaire de l'instrument, dans lequel nous détectons nos particules chargées.

Le scintillateur est directement couplé à un photomultiplicateur qui permet de recueillir les photons émis comme nous l'avons détaillé précédemment.

Les dimensions des raquettes que nous avons utilisé sont les suivantes :

$$30cm \times 20cm \times 1cm$$

Chapitre 3

Protocole expérimental

3.1 Caractéristiques du PM

Avant de commencer l'expérience sur les muons, nous étudions le fonctionnement d'un photo-multiplicateur dans une boîte noire, illuminé par une diode. Le PM est alimenté à un générateur haute tension (maximum de 2000V) et branché à un oscilloscope afin de voir sa réponse. La diode est alimentée par un générateur à impulsion qui est également relié à l'oscilloscope.

Les impulsions sur la diode sont fixées à une période de (**mettre la période**). On varie seulement l'amplitude de l'impulsion afin d'éliminer les rebonds du signal du PM observés sur l'oscilloscope. Le trigger est réglé sur -0.100 mV sur le signal du PM de manière à être au dessus du bruit de fond afin de ne pas déclencher de faux événements issus de ce bruit.

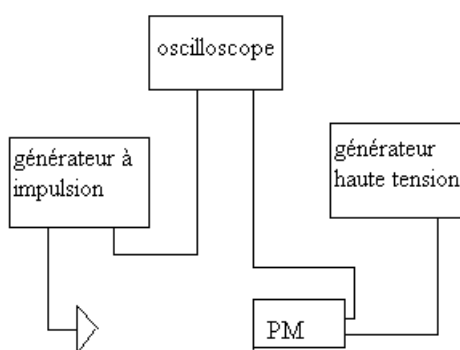


FIGURE 3.1 – Schéma du protocole de caractérisation du gain du photomultiplicateur.

Une fois les réglages effectués on observe la réponse du PM en faisant varier 2 paramètres :

- La distance diode-PM par pas de 5 cm.
- La tension sur le PM par pas de 50 V.

3.2 Détection des muons

Pour détecter les muons, on utilise des raquettes dans lesquels se trouve un PM. Ces raquettes sont alimentées par un générateur en 24V et sont reliées à l'oscilloscope. Elles sont également reliées à un *discriminant* qui permet d'effectuer des opérations logiques entre les différentes raquettes utilisées ainsi que de compter les événements.

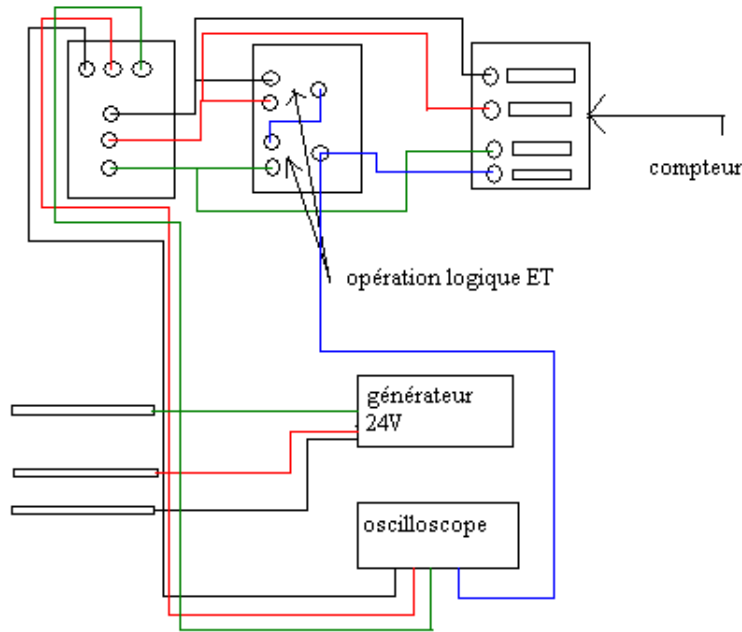


FIGURE 3.2 – Schéma des câblages effectués sur les différents matériels pour la détection des muons.

Comme le montre la figure 3.2, on utilise 3 raquettes reliées à l'oscilloscope et reliées au discriminant. On effectue les opérations noir ET rouge ET vert et on relie la réponse à l'oscilloscope. Cette opération, si elle est vraie, envoie un signal porte. On trigge sur cette fonction (**valeur du trigger**). Ainsi, si l'opération logique donne la réponse vraie, l'événement d'un muon passant dans la raquette 1, 2 et 3 est enregistré.

Un trigger est également appliqué (**valeur du trigger**) à l'entrée du discriminant pour sélectionner des événements en dehors du bruit de fond. On règle également la largeur de la fonction porte qui doit être suffisamment large pour laisser le temps au muons de traverser les raquettes, de traverser les fils et de réaliser les opérations logiques (**valeur de la largeur**).

Dans un premier temps, nous avons constaté qu'avec trois raquettes le nombre d'événements était très faible. Nous avons donc utilisé seulement deux raquettes espacées une première fois de 47.5 cm et une autre de 21.5 cm. Plus l'écart entre 2 raquettes est grand et plus l'angle solide d'incidence du muon est petit, par pure logique géométrique.

Chapitre 4

Caractérisation du gain du photo-multiplicateur

4.1 Programmes utilisés

4.2 Résultats des mesures

Chapitre 5

Analyses

On obtient en sortie de nos programmes, une distribution de charge pour la détection de muons.

But :

- 1) Mesure single-electron
- 2) Mesure du temps de vol des muons
- 3) Détermination de la masse des muons

Chapitre 6

Conclusion

Chapitre 7

Annexes

Chapitre 8

Bibliographie

<http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

A Photomultiplier Handbook

http://en.wikipedia.org/wiki/Scintillator#Organic_crystals

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_\(particle_radiation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_(particle_radiation))

http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray

E.J. Weinberg, et.al., Physical Review D54, Particles and Fields, 1996

Particle Physics Booklet, 1994

<http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>