

# **Travaux Pratiques Astroparticules**

## **Détection de muons cosmiques**

Nukri Komin

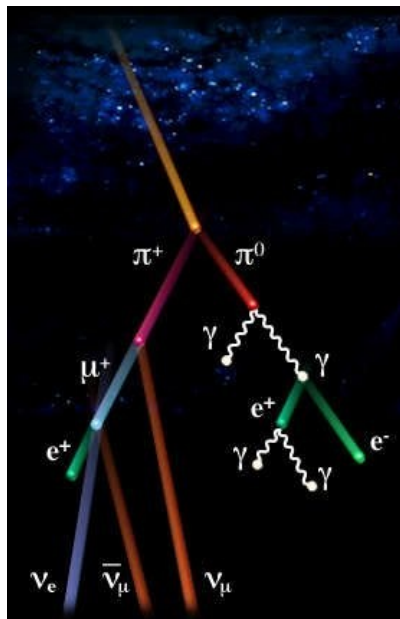
## Table des matières

1. Introduction.....	3
1.1. Les Muons.....	3
1.2. Objectifs.....	3
2. Contexte théorique.....	4
2.1. Vitesse des muons.....	4
2.2. Calcul de l'énergie perdue et de la masse.....	4
3. Contexte expérimental.....	5
3.1. Matériel utilisé.....	5
3.1.1. Les scintillateurs.....	5
3.1.2. Le photomultiplicateur.....	5
3.1.3. Discriminateur.....	5
4. Mesure de la masse du muon.....	6
4.1. Montage expérimental.....	6

# 1. Introduction

## 1.1. Les Muons

Les muons sont des fermions, particules de spin 1/2, décrites par le Modèle Standard de la physique des particules. Ils appartiennent à la famille des leptons tout comme les électrons mais ont une masse 207 fois supérieure à celui-ci. Le muon est chargé négativement :  $\mu^-$ , son antiparticule associée à une charge positive :  $\mu^+$ . Les muons ne sont pas stables, avec une durée de vie de l'ordre de la  $\mu s$ . Ce pendant cette durée de vie est suffisante pour qu'ils atteignent le sol terrestre où nous pouvons les détecter grâce à leur grande vitesse, proche de celle de la lumière.



Douche de désintégration d'un muon cosmique rentrant dans l'atmosphère terrestre.

Les particules de hautes énergies accélérées dans le milieu interstellaire par des phénomènes astrophysiques tels que les supernovæ sont en grande majorité des protons. Ceux-ci, en rencontrant l'atmosphère terrestre, produisent ce qu'on appelle des douches de particules. Le proton de haute énergie va se désintégrer en une cascade de particules dont des pions chargés qui vont eux même se désintégrer en muons que nous allons détecter.

## 1.2. Objectifs

Votre objectif principal est la détection des gerbes atmosphériques et des muons individuelles dans ces gerbes et le calcul de la masse du muon à l'aide de données obtenues lors des sessions de travaux pratiques.

Pour ce faire, votre étude s'est divisée en plusieurs points. Dans un premier temps, vous verrez les caractéristiques d'un muon et comment calculer sa masse à l'aide du dépôt d'énergie dans la matière. Dans un second temps, vous allez détecter plusieurs muons simultanément venant de la même gerbe.

## 2. Contexte théorique

### 2.1. Vitesse des muons

Nous calculons la vitesse incidente des muons à l'aide des écarts de temps de détection du signal  $\Delta t$  entre chaque plaque et de la distance entre les plaques. La vitesse est simplement calculée comme :

$$v_i = \frac{d_i}{\Delta t}$$

Cela nous permet de calculer le facteur de Lorentz gamma :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière.

### 2.2. Calcul de l'énergie perdue et de la masse

La masse des particules chargées peut être calculer à l'aide de la formule de Bethe, aussi appelé formule du  $dE/dx$ . Lorsqu'une particule chargée, ici un muon, traverse un de la matière, de préférence un métal, celle-ci va déposer de l'énergie dans la matière. C'est ce dépôt d'énergie que calcul la formule de Bethe :

$$\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left( \ln \frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right)$$

avec

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$$

et

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \approx 2.82 \text{ fm}$$

Où  $E$  est l'énergie déposée dans l'élément de matière  $dx$ ,  $e$  est la charge de l'électron,  $m_e$  est la masse de l'électron,  $Z$  est le numéro atomique et  $A$  le nombre de de masse du matériau.  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide,  $N_A$  le nombre d'Avogadro et  $I$  est le potentiel d'excitation moyen du matériau.

Déduisons maintenant la masse du muon depuis cette formule. Le muon perd une quantité d'énergie cinétique dans l'épaisseur  $d$  :  $\Delta E = - dE/dx d$ . L'énergie totale d'un muon relativiste est :  $E = \gamma m_\mu c^2$ . Cela nous mène donc à  $\Delta E = (\gamma_2 - \gamma_1) m_\mu c^2$ .

On en déduit donc la masse du muon :

$$m_\mu = \frac{dE}{dx} \frac{d}{(\gamma_2 - \gamma_1) c^2}$$

## 3. Contexte expérimental

### 3.1. Matériel utilisé

#### 3.1.1. Les scintillateurs

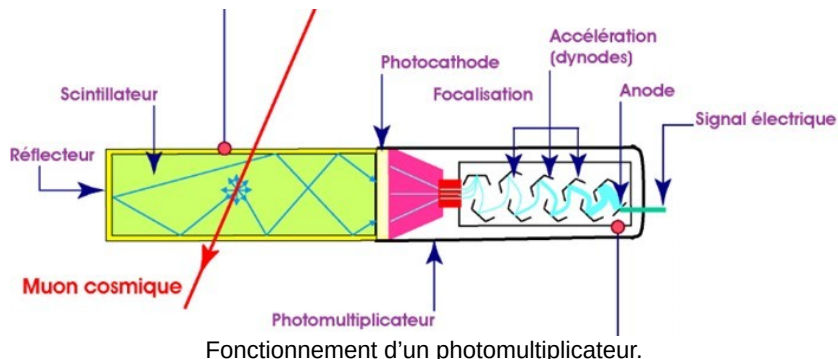
Dans le cadre de la détection des muons un des outils clé dans votre étude expérimentale est le scintillateur. Les scintillateurs sont de manière générale utilisée pour émettre de la lumière lorsqu'il est excité par radiations ionisantes. Dans les détections de particules, les scintillateurs utilisés peuvent être de différents types : organiques et inorganique.

Le scintillateur est en général constitué d'un milieu transparent. Ce milieu solide, par exemple plastique pour un scintillateur organique ou composé de cristaux pour un scintillateur inorganique, a pour tâche de diffuser des rayonnements de phosphorescence et de fluorescence après son excitation par le biais d'une particule chargée.

Après ce phénomène, les molécules excitées se dés excitent aussitôt en produisant un photon. Ceci fait, le photon sera ensuite détecté par les photomultiplicateurs.

#### 3.1.2. Le photomultiplicateur

Les photomultiplicateurs sont des dispositifs permettant la transformation d'un signal lumineux, en signal électrique. Dans le cadre de votre étude, ce sont les photons issus des scintillateurs qui seront captés par les photomultiplicateurs. Le schéma qui suivre représente le fonctionnement d'un photomultiplicateur.



Les photomultiplicateurs sont ainsi constitués de quatre types électrodes (de gauche à droite sur le schéma) : la photocathode, les dynodes et l'anode. Une fois l'émission d'un photon par le scintillateur, celui-ci va atteindre le photomultiplicateur par le biais de la photocathode et détache de celle-ci un électron qui rejoindra la première dynode soumise à un potentiel. En circulant de dynode en dynode, les électrons vont ensuite se voir gagner de l'énergie et ainsi augmenter leur nombre, constituant le phénomène d'amplification du signal électrique.

En effet, chaque dynode étant soumise à un potentiel plus puissant que la précédente cela générera des électrons. Le signal se trouve ainsi finalement amplifié.

#### 3.1.3. Discriminateur

Dans l'analyse du signal un module appelé discriminateur est également utilisé. Ce module a pour fonction de capter le signal émis par le photomultiplicateur. Ce signal, directement proportionnel à l'énergie déposée par les muons dans le scintillateur voit alors

son amplitude être comparée avec une amplitude seuil défini par l'expérimentateur. Ainsi, grâce au discriminateur, l'analyse ne sélectionne que des signaux correspondant à des muons et non à un bruit de fond.

De ce fait, seront sélectionnés uniquement les événements associés à un signal d'amplitude supérieure à la valeur seuil. Finalement, le module générera un signal carré d'amplitude constante qui pourra être analysé par l'utilisateur.

## 4. Mesure de la masse du muon

Afin de mesurer la masse du muon, vous avez à votre disposition trois raquettes, un discriminant, un trigger, un oscilloscope, un compteur reliés à un logiciel d'acquisition.

### 4.1. Montage expérimental

Pour pouvoir appréhender la masse des muons au travers de leur détection vous avez des scintillateurs à disposition pour l'expérience. Ces raquettes, placées comme décrit sur la figure vous permettront de détecter les éventuels muons par le biais de coïncidences issues du passage de mêmes muons dans plusieurs raquettes.

D'une manière générale, l'expérience était composée de :

- Trois ou quatre raquettes permettant la détection du passage des muons
- Trois ou quatre photomultiplicateurs permettant l'amplification des signaux enregistrés par les scintillateurs des raquettes
- Un oscilloscope permettant l'observation des canaux associés aux raquettes
- Un module de conversion d'informations analogiques à digitales
- Une planche logique dotée de portes AND utilisées pour la mise en place de coïncidence dans les signaux
- Un compteur permettant d'associer à chaque événement détecté un pas, nous permettant de suivre le nombre d'événements en temps réel

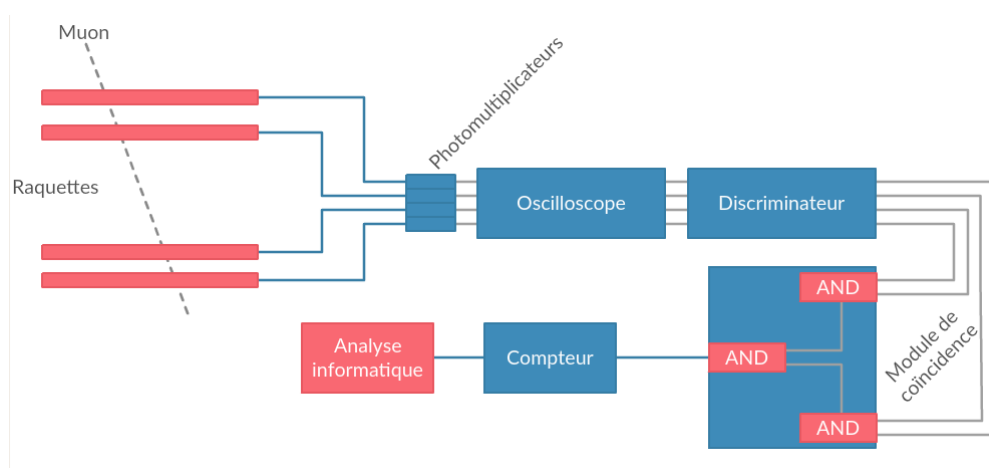
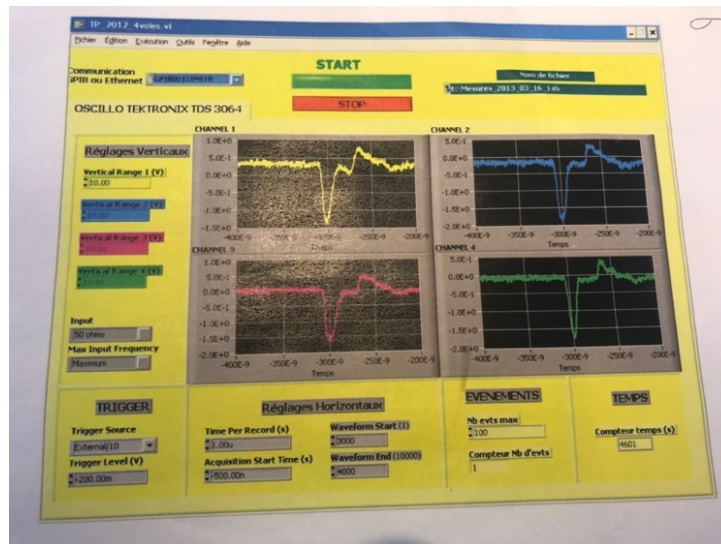


Schéma du principe

Le logiciel LabView est configuré de telle manière que lorsqu'un signal est envoyé dans l'entrée externe de l'oscilloscope et qu'il détecte la coïncidence des événements sur les trois raquettes ; il enregistre celui-ci.



Application Labview

Les données que vous avez récupérées sont sous la forme d'un tableau a cinq colonnes. La première colonne correspond au temps, les quatre autres colonnes correspondent aux quatre raquettes.

Pour le premier évènement, la colonne du temps commence à 0 avec un pas de  $2 \times 10^{-10} \text{s}$ , par contre pour les autres évènements, le temps est en seconde et il ne varie pas, il faut alors réidentifier le temps avec celui du premier évènement à chaque fois.

## 5. Détection des gerbes

Dans la dernière partie vous allez mettre en évidence des gerbes en détectant des muons simultanément dans les détecteurs avec un espacement latéral. Le point important est la comparaison du taux de coïncidences détectées avec le taux de coïncidences fortuites (statistique de Poisson !). Les étudiant.e.s développent le montage expérimental. Il y a deux options :

### 5.1.1. Mesurer la taille de la gerbe

Vous pouvez mesurer le taux de coïncidences avec plusieurs distances entre les raquettes. Cela nécessite que le comptage des coïncidences, sans l'enregistrement des pulses avec LabView. Il est important de mesurer et noter la durée des pulses et le temps d'observation.

### 5.1.2. Mesurer l'angle zénithal de la gerbe

Vous pouvez mesurer l'angle zénithal (et azimutal) de chaque gerbe en utilisant le délai entre les signaux. Dans ce cas il est important de mesurer et noté les distances entre les raquettes et leurs positions. Mots clefs : effet est-ouest, tomographie muonique.