

Étude expérimentale des muons cosmiques

Laurent Boué, *Université Paris 11-Orsay*
Christophe Ochando, *Université Pierre et Marie Curie Paris 6*

Stage réalisé sous la direction de Laurent Ménard, Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (I.P.N.)

12 octobre 2004

Résumé

Deux chaînes d'acquisition composées à la fois de modules N.I.M. et C.A.M.A.C. ont été mises en œuvre dans le but de mesurer quelques propriétés des muons cosmiques. La détermination de leur durée de vie est réalisée de deux manières indépendantes et les résultats obtenus sont consistants avec les valeurs tabulées. Le spectre en énergie des muons désintégrés dans le détecteur ainsi que celui des électrons issus de cette désintégration sont aussi présentés.

1 Origine des Muons

La Terre est constamment bombardée par des rayons cosmiques d'origines diverses (Soleil, supernovæ...). On peut diviser ce rayonnement cosmique en rayons cosmiques "primaires" et "secondaires".

Le rayonnement primaire est constitué en majorité de protons et de particules α . Ces particules entrent en contact (vers une altitude de 15 km) avec les noyaux formant la haute atmosphère terrestre. De telles rencontres déclenchent une cascade d'interactions à la fois nucléaires et électromagnétiques conduisant à la production de "gerbes" de particules de hautes énergies comme des pions chargés (Π^- et Π^+) ou neutres (Π^0), d'électrons ou de kaons... Les pions chargés ont une durée de vie très courte (quelques nanosecondes) au bout de laquelle ils décroissent au profit, entre autres, de muons et de neutrinos. Bien que ces muons "cosmiques" perdent une partie de leur énergie par multiples interactions électromagnétiques dans l'atmosphère, la section efficace correspondant à ce type de réaction reste très faible. Ils se désintègrent finalement par le biais de l'interaction faible pour donner naissance à des électrons et des neutrinos suivant les modes:

$$\begin{aligned}\mu^- &\longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \\ \mu^+ &\longrightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e\end{aligned}$$

Cependant, la grande énergie (plusieurs centaines de Gev) dont les muons cosmiques disposent au moment de leur création leur permet d'être les constituants principaux (80 %) avec les électrons (20 %) du rayonnement cosmique secondaire qui atteint la surface de la Terre. Le flux de ces muons dépend fortement de l'altitude mais il est proche à Paris de $1 \text{ muon.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ [1].

2 Détails sur le détecteur

Un détecteur scintillateur liquide a été utilisé au cours de cette expérience. Toute particule qui passe dans un tel détecteur transfère une partie de son énergie (ou la totalité si elle est arrêtée) aux atomes et molécules constituant le liquide. Cela entraîne par désexcitation l'émission d'un signal lumineux converti en signal électrique à l'aide d'un photomultiplicateur. Le système de détection et le photomultiplicateur étant tous les deux dans leur régime de fonctionnement linéaire, le signal électrique produit donne des informations sur les propriétés physiques de la particule détectée. En particulier, l'amplitude de ce signal est directement proportionnelle à l'énergie perdue par la particule. Le temps de réponse ainsi que le temps mort associés aux scintillateurs liquides sont très courts, ce qui rend ce type de détecteurs particulièrement bien adaptés à des mesures de temps. Il leur suffit en effet de quelques nanosecondes après la détection d'un événement pour être prêts à en détecter un suivant. Un désavantage qui apparaît lors de leur utilisation est leur très faible section efficace photoélectrique. Ceci rend difficile les étalonnages par sources de rayonnement γ qui doivent alors se baser uniquement sur la localisation de fronts Compton.

3 Perte d'énergie dans la cuve

La détection des particules est effectuée à l'aide d'un scintillateur liquide NE 224 de forme parallélépipé-

dique. Caractérisé par une densité ρ de 0.877 g.cm^{-3} [2], la cuve contenant le liquide est de dimensions $20*20*40 \text{ cm}^3$. Pour ce type de détecteur, l'énergie minimale d'ionisation E_{ion} est environ de $2 \text{ MeV.cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$ [3]. Il est raisonnable de penser que les particules provenant du rayonnement secondaire arrivent en grande majorité avec une direction verticale dans le détecteur. Dans ce cas, l'énergie maximale ΔE qu'elles peuvent y déposer après la traversée de la hauteur $h = 20 \text{ cm}$ de la cuve liquide est donnée par:

$$\Delta E = E_{ion} \times \rho \times h \approx 40 \text{ MeV}$$

Ce résultat signifie que seules les particules d'énergie cinétique inférieure à 40 MeV peuvent être arrêtées dans le détecteur.

Les particules créées dans la cuve à la suite d'une désintégration ont la possibilité d'y laisser davantage d'énergie cinétique. En effet, suivant leur direction d'émission et la position d'implantation de la particule mère, elles peuvent parcourir une distance supérieure à l'intérieur de la cuve. C'est le cas notamment des particules émises dans la direction longitudinale qui peuvent perdre jusqu'à 65 MeV .

4 1^{er} montage

La chaîne d'acquisition électronique de ce montage (représentée sur la figure 1) est composée uniquement de modules N.I.M.¹ et permet de déterminer la probabilité de désintégration des muons. Les signaux produits par la sortie anode du photomultiplicateur sont envoyés vers un discriminateur à fraction constante qui permet de s'affranchir des nombreux événements de basses énergies (bruit de fond électronique, présence de sources radioactives dans l'environnement expérimental...) qui perturbent la prise de données. Le seuil du discriminateur est réglé de manière à ne laisser passer que des événements d'énergies supérieures à 2 MeV , ce qui n'handicape en rien la détection des muons. Après être dupliqué par un module "Fan-in Fan-out", un signal ayant franchi le discriminateur est traité par un "Time Amplifier Converter" (T.A.C.) qui convertit de façon proportionnelle la différence de temps entre deux événements en amplitude de porte logique. Pour éviter que les signaux d'entrées arrivent en même temps, l'entrée "Start" est retardée de 40 ns par rapport à l'entrée "Stop". L'option "Range" du T.A.C. est fixée à $20 \mu\text{s}$ ce qui le restreint à ne coder que des couples d'événements séparés de moins de $20 \mu\text{s}$. Ce réglage assure qu'un signal en sortie du T.A.C. correspond (dans presque 100% des cas)

1. N.I.M. = Nuclear Instrument Module

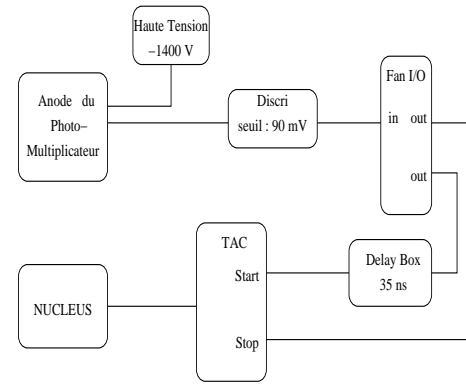


FIG. 1 – Schéma de principe du premier montage destiné à calculer la durée de vie des muons cosmiques.

à une désintégration de muon suivie par la détection de l'électron issu de cette réaction. Ce signal est finalement traité par la carte d'acquisition NUCLEUS qui numérise son amplitude et répartit les différentes amplitudes sur 2048 canaux.

5 2^{ème} montage

En plus de la durée de vie des muons, ce montage (voir figure 2) est destiné à mesurer simultanément l'énergie des muons qui se désintègrent et celles des électrons issus de cette désintégration. Ceci est rendu possible par l'introduction de modules C.A.M.A.C.² A.D.C. (Analog to Digital Converter) dont le fonctionnement est contrôlé informatiquement.

La reconnaissance d'un signal correspondant à un électron se fait à l'aide d'un module N.I.M. logique (LOGIC UNIT 81 A). La première entrée de ce module est alimentée par le signal sortant du discriminateur (réglé dans le même esprit que lors du premier montage) alors que la deuxième entrée correspond à une porte logique de largeur $20 \mu\text{s}$ et décalée de 80 ns . Le module logique ne génère une réponse que si ses deux entrées reçoivent simultanément un signal. On sait alors avec certitude qu'un tel signal correspond à la détection d'un électron formé lors de la désintégration d'un muon.

Un module T.A.C. (avec l'option "Range" fixée à $20 \mu\text{s}$ comme dans le premier montage) dont l'entrée "Start" est reliée à la sortie du discriminateur et l'entrée "Stop" à la sortie du module logique, permet d'accéder à la durée de vie des muons.

L'énergie des électrons de désintégration est donnée par intégration, en coïncidence avec la porte issue du module logique, de l'ensemble des signaux détectés.

2. C.A.M.A.C. = Computer Automated Measurement And Control

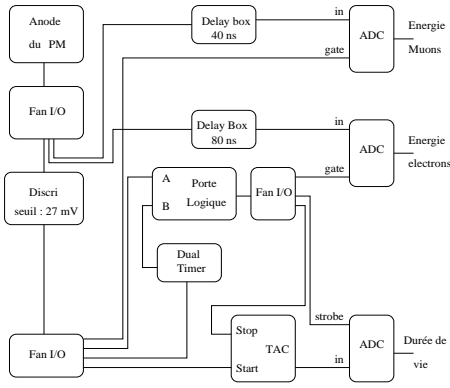


FIG. 2 – Montage permettant de mesurer simultanément, grâce à un pilotage informatique, l'énergie des muons qui se désintègrent, leur durée de vie et l'énergie des électrons issus de la décroissance des muons.

L'énergie des muons qui se désintègrent dans la cuve est aussi codée par un module A.D.C. Cependant, les signaux codés par ce module ne sont lus que si le module A.D.C. codant, en parallèle, l'énergie des électrons signale, par l'intermédiaire de sa sortie L.A.M. (Look At Me), qu'il a été activé. Ceci se traduit par un programme informatique (en constante communication avec les différents modules C.A.M.A.C.) qui permet de sélectionner les signaux correspondant aux muons qui se sont effectivement désintégrés dans la cuve.

6 Résultats

6.1 Durée de vie

La mise en œuvre pendant une durée de 107 heures du premier montage conduit, après un ajustement exponentiel sur un fond constant des résultats obtenus (figure 3), à $\tau_{fit1} = (2.101 \pm 0.057) \mu s$. Le fond constant est ajouté pour prendre en compte le bruit, indépendant du temps, du notamment aux rares événements se suivant de moins de $20 \mu s$ entre eux mais ne correspondant pas, à la fois, à la désintégration d'un muon et à la création d'un électron.

Il faut ajouter à cette durée de vie moyenne une correction de 40 ns venant du retard introduit avant le T.A.C. dans le dispositif expérimental. En plus des erreurs statistiques (contenues dans l'incertitude sur l'ajustement des données), il est aussi nécessaire de tenir compte des imprécisions introduites par l'électronique d'acquisition. Celles-ci peuvent être divisées de la manière suivante:

$$\sigma_{largeur\ du\ signal}^2 = (20\ ns)^2$$

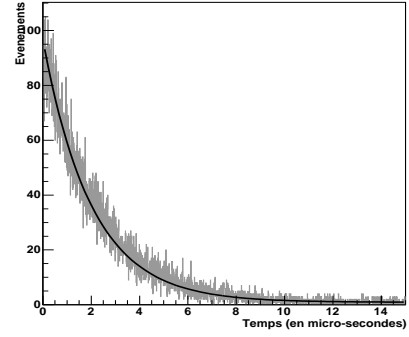


FIG. 3 – Probabilité de désintégration des muons cosmiques obtenu avec le 1^{er} montage. Les résultats expérimentaux sont ajustés par une exponentielle décroissante sur un fond constant qui correspond au "bruit".

$$\begin{aligned} \sigma_{discriminateur}^2 &= (10\ ns)^2 \\ \sigma_{electronique\ de\ lecture}^2 &= (20\ ns)^2 \end{aligned}$$

Le résultat final obtenu est:

$$\tau_{1er\ montage} = (2.141 \pm 0.064) \mu s.$$

La prise de données avec le second montage a été effectuée pendant une durée totale de 19 heures. Le résultat après ajustement exponentiel et en tenant compte du bruit de fond constant (figure 4) donne $\tau_{fit2} = (2.128 \pm 0.098) \mu s$. Il n'y a cette fois pas de correction à apporter directement à ce résultat. Les erreurs dues à l'électronique sont les mêmes que lors du premier montage mais, du fait du nombre accru de modules électroniques dans le système d'acquisition (notamment les modules C.A.M.A.C.), nous estimons que le bruit cohérent dû à l'électronique de lecture est un peu plus important:

$$\sigma_{electronique\ de\ lecture}^2 = (30\ ns)^2.$$

En tenant compte de ces corrections, nous obtenons:

$$\tau_{2eme\ montage} = (2.128 \pm 0.105) \mu s.$$

6.2 Spectres énergétiques

L'incertitude, dans le cadre des mesures d'énergies, vient essentiellement de l'imprécision sur la calibration des modules A.D.C. Cet étalonnage a été réalisé en repérant le front Compton d'une source radioactive. L'incertitude sur la position exacte en canal du front Compton (d'énergie connue) conduit à une imprécision de 5 MeV sur les énergies présentées dans les spectres. Par lecture directe sur les spectres expérimentaux (figures 5 et 6) nous obtenons:

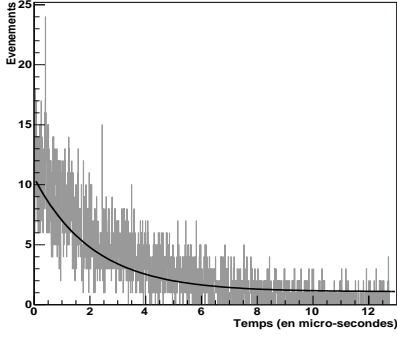


FIG. 4 – Ajustement par une exponentielle sur fond constant des données obtenues avec le second montage. Les paramètres de cet ajustement déterminent la durée de vie des muons présentée dans le texte.

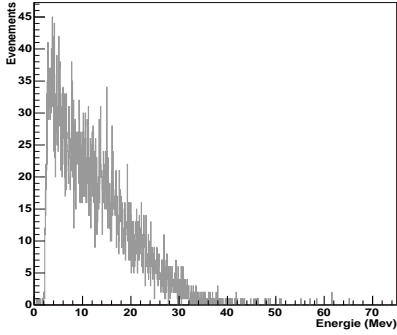


FIG. 5 – Spectre énergétique des électrons issus de la désintégration des muons. L'énergie maximale que peut emporter un tel électron est de 52 ± 5 MeV

$$E_{\text{électron max}} = (52 \pm 5) \text{ MeV.}$$

L'énergie maximale déposée par les muons est:

$$E_{\text{muons max}} = (41 \pm 5) \text{ MeV.}$$

6.3 Discussion

Temps de vie Les deux montages permettent d'obtenir chacun une estimation de la durée de vie des muons en accord avec la valeur acceptée [4]:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{réf}} &= (2.19703 \pm 0.00004) \mu\text{s} \\ \tau_{\text{1}^{\text{er}} \text{ montage}} &= (2.141 \pm 0.064) \mu\text{s} \\ \tau_{\text{2}^{\text{ème}} \text{ montage}} &= (2.128 \pm 0.105) \mu\text{s} \end{aligned}$$

La plus grande incertitude sur le temps de vie obtenue par l'exploitation des données du 2^{ème} montage

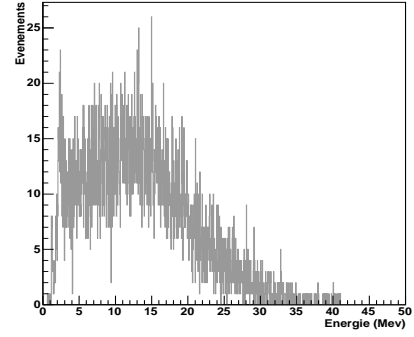


FIG. 6 – Spectre énergétique des muons arrêtés dans la cuve

par rapport à celles du premier s'explique par le faible nombre d'événements recueillis lors de cette prise de mesure. Le temps consacré à l'accumulation de données pour ce montage se révèle insuffisant puisqu'il laisse une place trop importante aux variations statistiques.

Bien que les valeurs du temps de vie obtenues soient toutes les deux constantes avec la valeur recommandée, nous remarquons que les valeurs moyennes trouvées sont systématiquement inférieures à la durée de vie de référence. Ceci peut être expliqué par le phénomène de capture muonique qui a pour effet de réduire la durée de vie effective des muons négatifs dans la cuve par rapport à leur durée de vie dans le vide. Comme un nombre égal de muons positifs et négatifs s'arrêtent dans la cuve et que 90% des μ^- ont une durée de vie de $2.04 \mu\text{s}$ [5], il semble plus réaliste d'attendre une durée de vie moyenne détectée d'environ $2.13 \mu\text{s}$. Dans cette hypothèse de section efficace de capture muonique non-négligeable, les résultats obtenus ont un écart inférieur à 1% par rapport à la valeur attendue.

Mesures d'énergies

- Le spectre en énergie des muons qui se désintègrent dans la cuve ne contient plus d'événement à partir d'environ 40 MeV. Ce résultat, déjà présenté dans la partie 3, permet de s'assurer du bien fondé de la calibration en énergie du système d'acquisition.
- La fréquence des événements dans le spectre énergétique des électrons de désintégration se réduit de façon significative à une énergie d'un peu plus de 50 MeV. Cela donne un ordre de grandeur de l'énergie maximale que peut emporter un électron lors de la décroissance du muon en électron et en deux neutrinos. Bien que ce résultat soit

en accord avec les prédictions théoriques d'une décroissance à trois corps, réaliser le même type d'acquisition pendant un temps plus long, aurait donné une idée plus précise de cette énergie.

[5] Eckhause, Fillipas, Sutton and Welsh, *Phys. Rev.* **132** 422 (1963)

7 Conclusion

Les résultats obtenus lors de cette expérience sont tous compatibles avec les mesures de précisions qui servent de références. Le travail d'analyse des données peut être poursuivi par des simulations informatiques visant à quantifier l'influence de notre méthode de détection sur les résultats publiés dans cet article.

Plusieurs améliorations du système de détection sont possibles. Une barrière de plomb située au dessus de la cuve pourrait servir à atténuer l'énergie des muons incidents et offrirait la possibilité d'observer légèrement plus de désintégrations. Un dispositif de miroirs entourant la cuve pour rediriger vers le photomultiplicateur les signaux lumineux qui s'en échappent permettrait aussi d'observer plus d'événements. Déplacer l'ensemble du dispositif ainsi modifié à La Paz, Bolivie où (en raison de l'altitude élevée) le flux du rayonnement cosmique secondaire est presque 9 fois plus important qu'à Orsay améliorerait aussi significativement les performances du dispositif de détection.

Remerciements

Nous voudrions remercier Laurent Ménard pour avoir accepté de diriger notre stage et pour son aide constante. Le bon déroulement de ce stage doit également beaucoup à Élias Khan pour ses interventions et à l'ensemble du D.E.A. Champs Particules Matières. Nous remercions aussi Madame Dominique Guillemaud-Mueller, directrice de l'Institut de Physique Nucléaire (I.P.N.) ainsi que l'école doctorale "Constituants Élémentaires et Systèmes Complexes".

Références

- [1] J.F. Ziegler *IBM Journal of Research and Development* Volume **42** Number 1 (1998)
- [2] Scintillators for the Physical Sciences, brochure No. 126 P from Nuclear Enterprises, Inc., San Carlos, CA 94070 USA
- [3] W.R. Leo: *Technique for Nuclear and Particle Physics Experiments* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994)
- [4] Review of Particle Physics D.E. Groom *et al.* The European Physical Journal **C 15** (2000)