

Mesure du temps de vie des muons cosmiques

J. QUÉVA* & J. SERRANO*

Septembre 2004

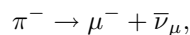
Encadrant : M. Élias KHAN†

RÉSUMÉ : Dans cet article nous exposons une méthode de mesure de la durée de vie du muon en utilisant un scintillateur plastique liquide. Nous n'avons pas de sources de muons proprement dite mais nous utilisons les rayons cosmiques qui nous fournissent constamment des particules de haute énergie. Dans un premier temps, nous présentons un montage NIM permettant d'obtenir le temps de vie, puis nous améliorons cette expérience en utilisant des modules CAMAC qui nous donnent également l'énergie des particules détectées.

ABSTRACT : In this article, we expose a method to measure the muon mean life using a plastic liquid scintillator, we have not any real sources of muon but we use cosmic rays which provide us high energy particles continuously. In a first time we present a NIM experiment to obtain lifetime, then we improve it using CAMAC moduls which also give us the energy spectrum of detected particles.

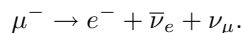
1. Introduction

Depuis les découvertes de Pierre AUGER nous savons que la Terre est soumise à un perpétuel bombardement de particules. Ce rayonnement cosmique se décompose en deux parties : le rayonnement « primaire », les particules viennent de sources externes à la planète, et « secondaire », elles sont issues d'interactions entre le rayonnement primaire et le gaz interstellaire, plus particulièrement avec l'atmosphère terrestre. Les muons appartiennent au rayonnement secondaire, ils sont majoritairement créés par la réaction :



à une altitude d'environ quinze kilomètres [PDG-04]. Lors de leur production, ils acquièrent une énergie suffisante pour atteindre, par dilatation du temps, la surface terrestre. Ils présentent, au niveau de la mer, une distribution en énergie centrée sur 4 GeV avec un flux incident d'approximativement $I = 1 \text{ particule} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'ensemble des muons à plus de 1 GeV .

Le muon est une particule instable dont le principal mode de désintégration est :



Son temps de désintégration étant une variable aléatoire on observe que pour une population initiale de N_0 muons le nombre ayant survécus à $t > t_0 = 0$ est :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

*Étudiants en DEA Champs, Particules, Matières.

†MCF Université Paris XI, khan@ipno.in2p3.fr

où λ est un paramètre caractéristique du muon [LEO-94]. On se propose, dans cette expérience, de mesurer le temps de vie, ou la *vie moyenne du muon*, défini comme :

$$\tau \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{\int_{\mathbb{R}^+} dt t N_0 e^{-\lambda t}}{\int_{\mathbb{R}^+} dt N_0 e^{-\lambda t}} = \frac{1}{\lambda}.$$

Nous comparerons cette mesure à celle fournie par le Particle Data Group

$$\tau = (2,19703 \pm 0,00004) \times 10^{-6} \text{ s}$$

2. Principe de l'expérience

Pour observer une désintégration, il faut ralentir le muon jusqu'à ce qu'il soit au repos et qu'il se désintègre en émettant un électron ; l'expérience consiste donc à détecter un muon et son électron, et à mesurer le temps séparant ces deux événements. Le spectre de cette différence temporelle doit être de la forme :

$$N(\Delta t) = N_0 e^{-\lambda \Delta t} + \alpha,$$

α étant le nombre d'événements fortuits. On pourra en déduire le paramètre λ puis la durée de vie.

Pour faire ces mesures on utilise un scintillateur liquide NE 224 couplé à un photomultiplicateur, RTC S5630, et relié à une chaîne électronique. L'acquisition est pilotée à partir d'un PC. Nous avons pu faire deux séries d'expériences : la première avec des modules NIM (Nuclear Instrumentation Modules) et le programme "*Nucleus*", la seconde en utilisant un chassis CAMAC (Computer Automated Measurement And Control) et un programme en C, ce qui nous a permis d'avoir à la fois le spectre en temps et les spectres en énergie des muons désintégrés et des électrons.

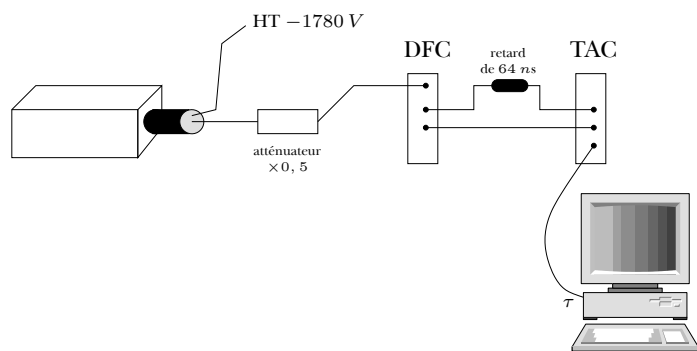


FIGURE I — Le schéma de montage de la première expérience, le signal d'anode est envoyé dans un discriminateur (à fraction constante DFC), le seuil étant à -600 mV , on retarde le signal sur le start de 64 ns et la sortie du TAC est envoyée vers la carte *Nucleus*.

Le choix du scintillateur est dicté par les contraintes de l'expérience : la grandeur physique la plus importante étant le temps, il est nécessaire d'avoir un temps de réponse très rapide. Le scintillateur qui nous a paru le plus approprié est un scintillateur organique liquide (NE 224) que l'on alimente avec une tension de -1780 V .

L'énergie déposée dans le scintillateur par les muons est de l'ordre de 40 MeV , pour les électrons, elle est au maximum égale à $M_\mu/2 \simeq 50 \text{ MeV}$ [NIS-00]. Le spectre en énergie des muons atmosphériques est centré autour de 4 GeV , les muons dont on peut observer la désintégration se situent donc au tout début du spectre et sont peu nombreux. Afin d'avoir un taux de comptage un peu plus élevé nous avons recouvert le scintillateur d'une couche de plomb qui permet de déléster les muons incidents d'environ 150 MeV et de réduire sensiblement le bruit. Nous avons utilisé un discriminateur ne sélectionnant que les signaux de haute énergie. Si deux signaux d'amplitude supérieur au seuil arrivent à moins de $10 \mu\text{s}$ d'intervalle on a de fortes chances pour qu'ils soient la signature d'un muon et de son produit de désintégration car le taux d'événements fortuits correspondant à deux

muons est très faible : $N_{\text{fortuites}} = \tau n_1 n_2$, avec τ l'intervalle de temps considéré (ici $10 \mu\text{s}$) et $n_1 = n_2$ le nombre de muons incidents par seconde ($n_1 \simeq 10 \text{ muons} \cdot \text{s}^{-1}$). Donc

$$\begin{aligned} N_{\text{fortuites}} &= 10^{-6} \times 10^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ s}^{-1} \\ &\Leftrightarrow 0,3 \text{ événements} \cdot \text{heures}^{-1}. \end{aligned}$$

Le taux d'événements fortuits est donc négligeable devant le taux de muons qui se désintègrent dans le détecteur (environ 5 par minute).

3. Expérience NIM

Le signal d'anode du photomultiplicateur est envoyé dans un discriminateur à fraction constante, Inel 4351, dont le seuil est réglé à -600 mV . Celui-ci donne deux signaux logiques : l'un d'eux est envoyé dans l'entrée *stop* du TAC (convertisseur temps-amplitude), Ortec 566, et l'autre est retardé de façon à constituer un signal de *start* qui ne soit pas superposé au *stop*. Le TAC sélectionne un *stop* s'il arrive à moins de $10 \mu\text{s}$ du *start* et renvoie en sortie un signal logique d'amplitude proportionnelle à la différence de temps entre le *start* et le *stop*. Ce signal est reçu par *Nucleus* puis traduit en graphe. Le taux de comptage étant très faible, il est nécessaire d'effectuer une acquisition sur plusieurs jours pour avoir une statistique suffisante. Le spectre que nous avons obtenu après deux jours et demi d'acquisition est donné dans la Figure II. A partir du logiciel *Root* on a établi un ajustement de courbe pour avoir les paramètres de l'exponentielle. Après avoir calibré le détecteur en temps nous avons

$$\Delta t = \Delta \text{Canal} \times 0,0073 \cdot (1 \pm 0,0005) \mu\text{s}.$$

Ainsi on obtient une durée du vie du muon de :

$$\tau = (2,12 \pm 0,04) \mu\text{s}$$

soit une déviation par rapport à la valeur donnée par le PDG de $(2,19 - 2,12)/2,19 = 3,2\%$. Les erreurs se décomposent en deux types : les erreurs statistiques que *Root* nous donne directement et une erreur due à l'étalonnage en temps. Ces deux contributions étant décorrélées on a $\sigma^2 = \sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{temps}}^2 \simeq 0,04^2$.

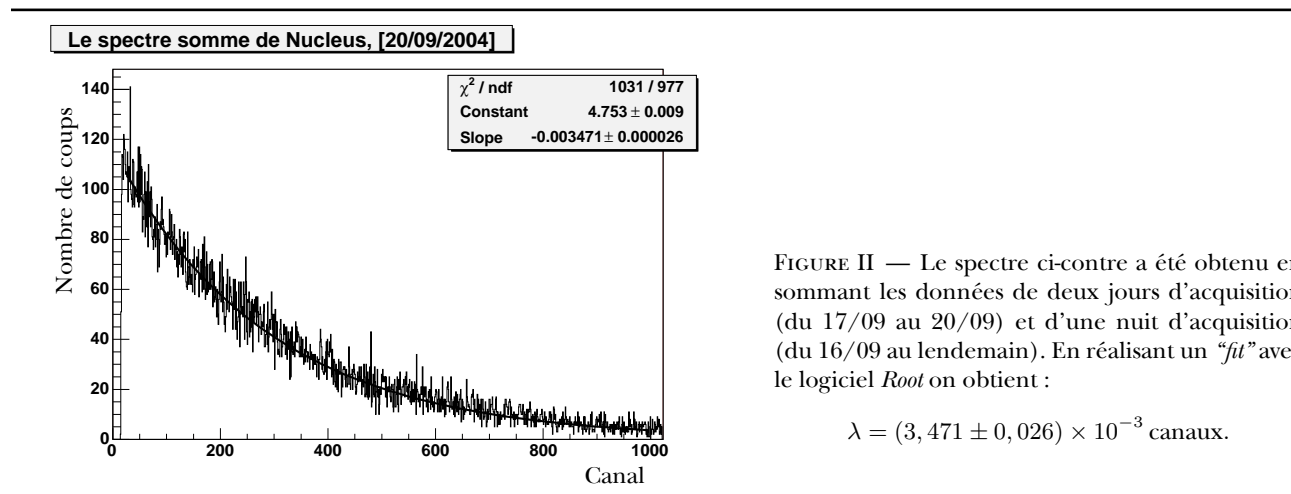


FIGURE II — Le spectre ci-contre a été obtenu en sommant les données de deux jours d'acquisition (du 17/09 au 20/09) et d'une nuit d'acquisition (du 16/09 au lendemain). En réalisant un "fit" avec le logiciel *Root* on obtient :

$$\lambda = (3,471 \pm 0,026) \times 10^{-3} \text{ canaux}.$$

4. Le montage CAMAC

Fort de l'expérience acquise avec le précédent montage, nous avons cherché à combler les lacunes du-dit montage. Le principal problème vient de *Nucleus*; en effet, ce dernier ne code que sur un canal, or nous aimerions avoir accès, durant l'acquisition, à plus d'informations que simplement le temps. Pour ce faire nous avons troqué la carte *Nucleus* pour deux cartes CAMAC (Lecroy 2249A et Gen Elec ADC 812F). De plus, on adjoint aux modules de l'expérience précédente un *linear fan-in/fan-out* (Linear FiFo), Lecroy 428F, pour dupliquer le

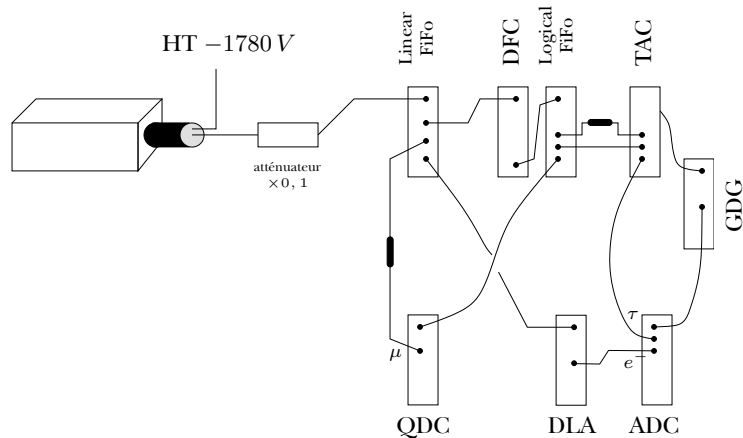


FIGURE III — Schéma de principe du second montage. Le circuit pour l'acquisition du temps est le même que dans le premier montage. Seules diffèrent les deux voies pour l'acquisition des électrons et des muons. Le tout est mis en forme et en temps par les divers modules présentés ci-contre.

signal d'anode, un *logical fan-in/fan-out*, Inel 4282, pour dupliquer ceux du discriminateur, un *delay line amplifier*, Ortec 460, pour amplifier/intégrer le signal analogique correspondant à l'électron. Le schéma de principe de l'expérience est donné dans la Figure III.

La mesure en temps s'effectue comme auparavant, mais, maintenant, on exploite la sortie "Val Conv" du TAC : cette dernière forme un créneau à +5 V si le TAC a reçu un *start* puis un *stop* dans les dix microsecondes consécutives au *start*. Le créneau est émis à temps fixe, plus ou moins réglable, après réception du *stop*. On passe le *Val Conv* dans un *Gate and Delay Generator* (GDG) afin de le mettre en forme et en temps avec le signal analogique correspondant au *stop* (*a priori* un électron). Ainsi l'ADC, en déclenchant sur le "Val Conv", va lire à la fois le signal de sortie du TAC et l'énergie de l'électron. L'énergie du muon est quant à elle lue par un QDC auquel on envoie directement le signal du Linear FiFo et qui déclenche sur le signal de sortie du discriminateur (seuil à -140 mV). Le tout est coordonné par un programme en C dans lequel on choisit de faire le LAM (Look At Me) sur l'ADC afin d'acquérir l'énergie du muon seulement lorsqu'une désintégration s'est produite, on évite ainsi de garder les énergies de tous les muons traversant le détecteur.

5. Résultats

Nous avons accumulé des données sur trois journées et cinq nuits. Pour le spectre en temps, Figure IV, on retrouve bien une forme exponentielle mais on observe un effondrement de la courbe autour du *bin 400*, sur une largeur de 100 *bins* environ. Nous avons essayé de trouver l'origine de cette anomalie mais sans succès (suite aux tests l'erreur est imputable soit à l'ADC soit au châssis), nous n'avons donc pas pu exploiter la première partie de la courbe. Cependant, en utilisant la calibration

$$\Delta t = \Delta \text{Canal} \cdot (2,397 \pm 0,012) \times 10^{-3} \mu s$$

le *fit* obtenu à partir du canal 550 donne une valeur de la durée de vie du muon très satisfaisante :

$$\tau = (2,17 \pm 0,04) \mu s$$

Ce qui représente une erreur relative à celle du CERN de $(2,19 - 2,17)/2,19 = 0,9\%$.

Le spectre en énergie des muons et des électrons est plus difficile à interpréter car les scintillateurs liquides n'ont pas une bonne résolution en énergie. Nous avons calibré le détecteur avec des sources de ^{137}Cs et ^{22}Na , comme pour le montage NIM, mais la relation qu'on peut en déduire est vraiment très grossière, surtout pour la voie électrons. Pour les muons, on estime que 100 canaux correspondent, en gros, à 5 MeV. Le spectre des muons s'échelonne donc entre 10 et 40 MeV avec un maximum à 35 MeV. Cette mesure concorde assez bien avec ce qu'on s'attendait à voir, une chute de la courbe à 40 MeV mais son aspect reste par contre difficile à interpréter. Nous avons établi une correspondance entre les canaux de la voie électron et celle de la voie muon : Canal muon = 0,416 × Canal électron - 1,673. On peut ainsi évaluer l'énergie déposée par les électrons : de quelques MeV à 40 MeV. Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur mais elles restent en accord avec le

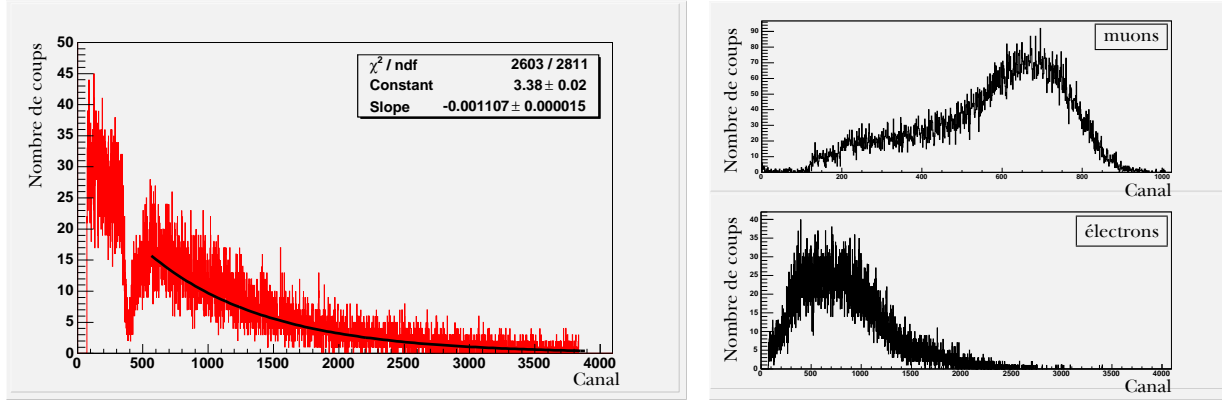


FIGURE IV — Les trois spectres présentés nous donnent respectivement les mesures en temps, puis les spectres en énergies des muons et des électrons. L'énergie du muon est codée par le QDC sur 1024 canaux, celle de l'électron sur 4096 par l'ADC.

fait que l'énergie maximum déposée par les électrons est égale à $M_\mu/2 \simeq 50 \text{ MeV}$. La forme du spectre peut surprendre car on s'attend plutôt à voir une courbe croissante jusqu'à 50 MeV et plus rien après. En fait, ce serait vrai pour un détecteur de taille infinie mais nous devons ici tenir compte de la géométrie de la cuve. Pour mieux comprendre cet effet nous avons effectué une simulation, de type Monte-Carlo, du détecteur.

6. La simulation

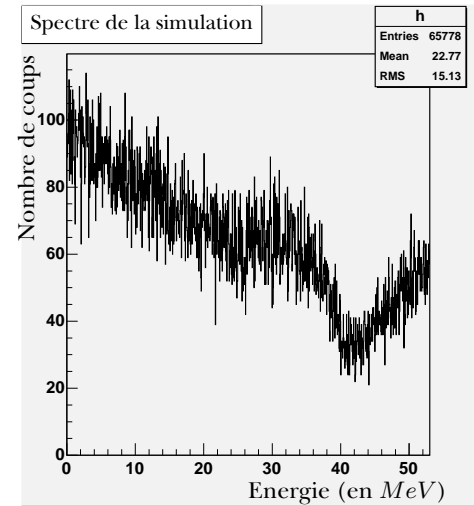
La simulation est sous-tendue par quatre hypothèses (raisonnables en première approximation) : 1. le muon est au repos lors de sa désintégration en électron, 2. la probabilité de désintégration est homogène dans toute la cuve, 3. l'électron traverse la cuve suivant une droite et 4. la réponse du détecteur est identique quelle que soit l'énergie déposée. Le programme se passe ainsi : dans un premier temps on tire au hasard le lieu de création de l'électron et sa direction initiale, puis on tire son énergie initiale suivant l'équation électrofaible [PDG-04] :

$$\frac{d^2\Gamma}{dq d\cos\theta} \simeq q^2 \left\{ 3(1-q) + \frac{2\rho}{3}(4q-3) + 3\eta \frac{q_0}{q}(1-q) \pm P_\mu \zeta \cos\theta \left[1-q + \frac{2\delta}{3}(4q-3) \right] \right\}$$

qui dans le cadre du modèle standard et de la géométrie de notre détecteur se réduit à :

$$\frac{d\Gamma}{dq} \simeq 3q^2 - 2q^3,$$

où $q \stackrel{\text{déf}}{=} 2E_e/M_\mu$. Nous résolvons cette équation numériquement. Pour terminer, on calcule l'énergie déposée dans le détecteur. La simulation nous a donné le spectre ci-contre qui est bien décroissant comme le spectre observé, mais présente une remontée que nous ne savons expliquer au-delà de 40 MeV .



7. Conclusion

Les montages que nous avons mis en place, tant NIM que CAMAC, nous ont permis de retrouver une valeur de la durée de vie du muon proche de celle communément admise. Grâce à la technologie CAMAC nous avons pu acquérir simultanément le temps et l'énergie (des muons et électrons produits de leur désintégration).

Cependant, les spectres en énergie ne nous donnent qu'une esquisse des spectres réels, la calibration en énergie et le manque de statistique ne permettant pas d'avoir une résolution suffisante pour les exploiter. Si nous avions eu plus de temps nous aurions pu améliorer l'expérience en :

- ajoutant un second détecteur afin de stopper plus de muons,
- substituant le TAC par un TDC (codeur en temps sur le format CAMAC),
- résolvant le problème du "trou" dans le spectre, celui-ci nous faisant perdre une grande partie des données.

8. Remerciements

Nous tenons à remercier M. Élias KHAN, dans un premier temps pour avoir proposé ce sujet, puis pour nous avoir guidé lors du déroulement du TL. De même nous aimerions exprimer toute notre gratitude à M. Laurent MÉNARD pour l'ensemble des conseils qu'il nous a donné.

Références

- [PDG-04] S. EIDELMAN et al, "*particle trough matter*", "*Muon Decay Parameters*" & "*cosmic rays*", Phys. Lett. B **592**, 1 (2004), <http://pdg.lbl.gov/pdg.html>.
- [LEO-94] W.R. LEO, "*Techniques for nuclear and particle physics experiments*", Springer-Verlag, 1994.
- [NIS-00] M.J. BERGER, J.S. COURSEY et M.A. ZUCKER, "*Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*", <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html>, 2000.