

# Experimento para medir a vida média do múon

**Palavras-Chave:** raios cósmicos, vida média do múon, detector de partículas

**Autores/as:**

**Jorge Henrique de A. P. Reis [Unicamp]**

**Prof. Dr. Anderson Campos Fauth (orientador/a) [Unicamp]**

## INTRODUÇÃO:

Nesse projeto, foi medida a vida média do múon utilizando a radiação cósmica local. Ela é constituída de núcleos atômicos que viajam a velocidades muito próximas à da luz. Essas partículas podem vir de supernovas, de núcleos de galáxias, buracos negros, dentre outros fenômenos astrofísicos, apesar de ainda não se possuir certeza sobre sua origem). As partículas da radiação adentram na atmosfera terrestre e eventualmente colidem ou interagem com núcleos de nitrogênio, oxigênio e outras moléculas presentes na atmosfera. Essas interações acabam dando origem a novas partículas, as quais, por sua vez, podem ainda decair em outras novas partículas. Ocorrendo sucessivas colisões, produções e decaimentos, repetidas vezes e em cascata, gera-se o que se conhece por *chuveiros atmosféricos*.

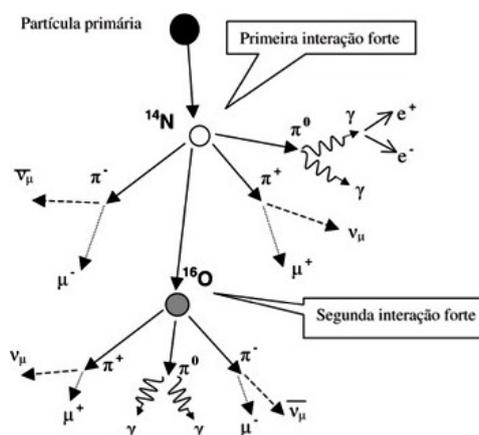


Figura 1 - Exemplo de chuveiros atmosféricos na atmosfera terrestre.

## METODOLOGIA:

Como resultado dos chuveiros atmosféricos, e também por consequência dos efeitos da dilatação do tempo, os múons conseguem atravessar a atmosfera e chegar ao nível do solo (e até mais fundo), apesar do seu relativamente baixo tempo de vida média (aproximadamente  $2,2 \mu s^*$ ).

No experimento, esse tempo de vida médio é obtido ao se relacionar não o tempo de produção da partícula na atmosfera até o momento do seu decaimento, mas sim ao se analisar a distribuição estatística do intervalo de tempo de detecção de um múon (ou anti-múon) e do sinal do seu respectivo produto de decaimento (do elétron ou do anti-elétron), conforme as equações de decaimento:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu$$

A distribuição dos intervalos de tempo segue a função

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} + C \quad (1)$$

onde  $N_0$  é a quantidade total de eventos registrados/coletados,  $\tau$  é o tempo de vida médio e a constante  $C$  é adicionada para contemplar ruídos experimentais espúrios (os quais possuem uma distribuição de probabilidade aproximadamente uniforme de ocorrer).

Para conseguir, então, encontrar a vida média do múon, faz-se uma regressão exponencial da distribuição de frequências do decaimento. Isto é, faz-se um ajuste de uma exponencial a um histograma das diferenças de tempo. É importante notar que a medição se refere à diferença de tempo entre dois pulsos consecutivos, da presença do múon até o aparecimento do elétron, conforme as equações de decaimento. Isto é, a partir do momento que o múon entra no detector, medimos a diferença de tempo entre sua aparição – e consequente desintegração – e a aparição do elétron.

Para a realização do experimento, foi usado um cintilador de plástico cilíndrico, uma fonte de alta tensão, uma fotomultiplicadora, um osciloscópio e um computador. No caso, esses elementos podem ser redistribuídos em dois grupos: detector e sistema de aquisição. O detector se remete à parte para transformar o sinal do depósito de energia das partículas em um sinal de tensão para então ser registrado. Já o sistema de aquisição tem por finalidade converter os pulsos

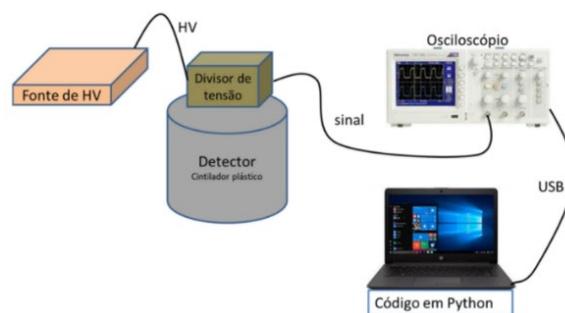


Figura 2 - Representação do aparato experimental e do sistema de aquisição utilizado.

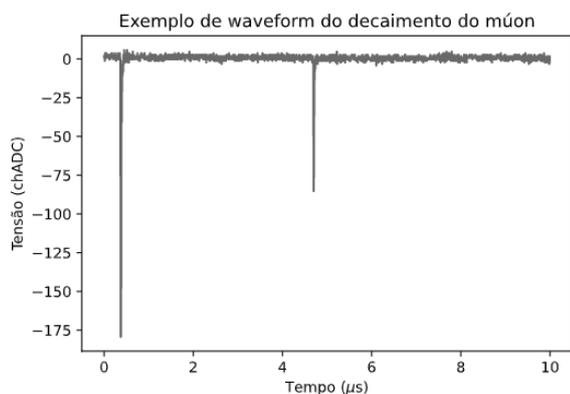


Figura 3 - Exemplo de waveform coletada. Pode-se ver o primeiro pulso relativo ao múon e o segundo, ao elétron.

analógicos em digitais, de maneira autônoma, e salvar os eventos num computador, para que possam ser posteriormente analisados. Ainda no sistema de aquisição, o programa construído foi feito em linguagem Python, por intermédio da biblioteca do *pyvisa*, que possibilita uma interface de comunicação entre o osciloscópio e o computador, para coletar automaticamente os dados, pela porta USB.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com os dados adquiridos, fez-se um ajuste de uma função exponencial para obter as constantes da equação (1) que dará, como um dos valores, a vida média do múon. Seguem os resultados:

Tabela 1 - Valores encontrados na regressão com suas respectivas incertezas.

	Valor	Incerteza	Unidade
$N_0$	5555	-	-
$N_0 / \tau$	2537,31	4,88	$\mu s^{-1}$
$\tau$	2,168	0,009	$\mu s$
$C$	10,1	2,4	$\mu s^{-1}$

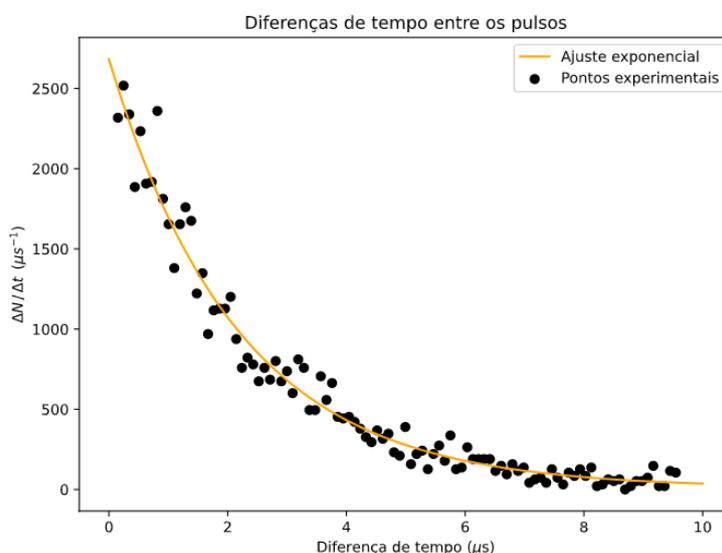


Figura 4 - Diferença de tempo entre os picos do múon e do elétron detectados. A curva em amarelo representa o ajuste exponencial no histograma usando um valor total de  $N = 5555$  eventos com 100 bins.

Além do resultado da vida média do múon, foi possível medir a energia depositada pelas partículas que atravessam o detector. Isto é, passando um múon dentro do cintilador, por exemplo, foi possível medir a sua energia depositada  $dE/dx$ .

A calibração foi feita tomando por base a energia depositada pelo *single muon*. Esse tipo de múon está numa faixa energética, em torno de 4 GeV, que corresponde ao mínimo da equação de depósito de energia. É também a faixa de energia mais abundantemente encontrada ao nível do solo. Conhecendo a densidade do cintilador e o traçado do múon, podemos calcular a energia depositada por ele. Uma vez que o detector é proporcional aos níveis de tensão medidos, é possível relacionar linearmente o valor da energia depositada por esse múon (aproximadamente 25,84 MeV) com o valor da integral do pulso de cada evento (ou seja, com a carga depositada por ele).

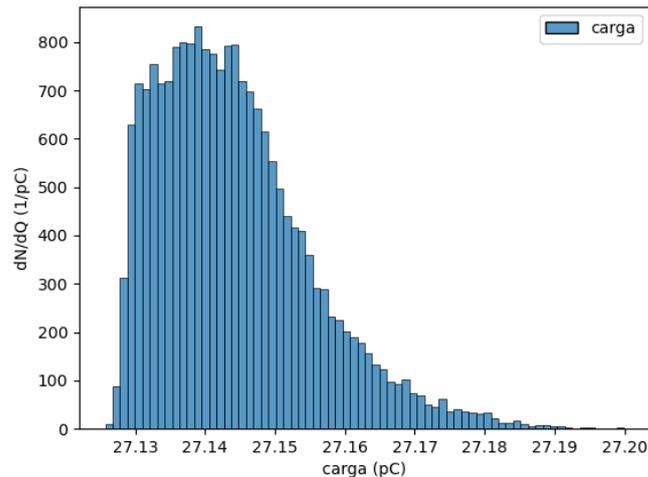


Figura 5 - Histograma do espectro de energia do single múon. Essa calibração relaciona a energia depositada pelo single múon com a carga elétrica medida no osciloscópio.

## CONCLUSÕES:

Como explicitado acima, o resultado obtido é uma vida média  $\tau = (2,168 \pm 0,009) \mu\text{s}$  para o múon. O resultado se mostra, à primeira vista, insatisfatório, pois, comparando-o com o valor do *Particle Data Group* (PDG),  $\tau = (2,1969811 \pm 0,0000022) \mu\text{s}$ , o resultado está fora da incerteza, embora esteja consideravelmente perto.

O resultado um pouco menor, na verdade, é condizente se considerarmos que no experimento não existe uma distinção clara entre  $\mu^+$  e  $\mu^-$ , sendo que há os efeitos de captura do múon negativo. Esse fenômeno acontece porque o múon negativo interage com o núcleo atômico das partículas que constituem o material que ele atravessa, podendo ser capturado (resultando em um nêutron e um neutrino). Isso pode explicar a redução do tempo médio em relação à medida do PDG, que é realizada no vácuo e, portanto, não lida com esse problema em particular.

Com a curva de calibração da energia depositada pelo *single muon*, pode-se verificar que o depósito possui uma correspondência com o valor de carga de 27,1387 pC. Isso significa que cada valor de carga medido no osciloscópio na verdade corresponde a um valor proporcional a aproximadamente 0,95 MeV/pC depositado no detector. Essa curva de calibração, então, permite medir o valor do depósito de energia de qualquer partícula que o atravessa.

---

## BIBLIOGRAFIA

PARTICLE DATA GROUP. **Cosmic rays**. Revisão de outubro de 2019.

Disponível em: < <https://pdg.lbl.gov/2021/web/viewer.html?file=%2F2021/reviews/rpp2020-rev-cosmic-rays.pdf> >

PARTICLE DATA GROUP. **Passage of particles through matter**. Revisão de agosto de 2019.

Disponível em: < <https://pdg.lbl.gov/2021/web/viewer.html?file=%2F2021/reviews/rpp2020-rev-passage-particles-matter.pdf> >

WILLIAM, R. Leo. **Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach**. Springer. Science & Business Media, 2012.

A C Melissinos and Jim Napolitano. **Experiments in modern physics**; 2nd ed. Academic Press, New York, NY, 2003.

Andrzej Czarnecki, Matthew Dowling, Xavier Garcia i Tormo, William J. Marciano, and Robert Szafron. **Michel decay spectrum for a muon bound to a nucleus**. Phys. Rev. D, 90:093002, Nov 2014.