

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Rio de Janeiro

Notas Técnicas

CBPF-NT-003/18

março 2018

Medidas de Fluxo, Velocidade e Vida-média de múons no Rio de Janeiro

Anderson Souza, Andre Massafferri, Aroldo Ribeiro Neto, Eva Leticia Pereyra, Frederico Sousa, Gilvan Augusto Alves, Guilherme Oliveira, Julia Marcolan, Pedro Rossini Sardelich, Vitor Cunha, Wellisson Lima and Williane Bernardes



Medidas de Fluxo, Velocidade e Vida-média de múons no Rio de Janeiro

Measurements of Flux, Velocity, and Mean lifetime of Muons in Rio de Janeiro

Anderson Souza¹, André Massafferri², Aroldo Ribeiro Neto³, Eva Leticia Pereyra⁴,
Frederico Sousa³, Gilvan Augusto Alves², Guilherme Oliveira³, Julia Marcolan⁵,
Pedro Rossini Sardelich⁶, Vitor Cunha², Wellisson Lima⁷, Williane Bernardes^{3*}

Universidade Estadual de Campinas¹,

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas²,

Universidade Federal de Minas Gerais³,

Universidad Nacional de La Plata⁴,

Universidade Federal Fluminense⁵,

Universidade Federal do ABC⁶,

Universidade Federal de Viçosa⁷,

Submetido: 12/09/2017

Aceito: 15/03/2018

Resumo: Este trabalho apresenta as atividades desenvolvidas durante a 2^a EAFExp no módulo Instrumentação em Física de Partículas, realizada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, durante 5 dias, sob a orientação dos pesquisadores André Massafferri e Gilvan Augusto Alves. Os objetivos principais foram conhecer e explorar as técnicas necessárias na detecção de partículas elementares e medir suas propriedades físicas. Nesse contexto, medimos fluxo, velocidade e vida-média de múons produzidos em chuveis de raios cósmicos. Os resultados obtidos são compatíveis com várias medidas existentes e demonstram que a Teoria da Relatividade Especial fornece a melhor descrição para sistemas envolvendo altas velocidades.

Palavras chave: instrumentação - múons - fluxo - velocidade - vida-média - altas energias.

Abstract: This report presents the activities developed during the 2nd EAFExp in the Instrumentation in Particle Physics module of Brazilian Center for Research in Physics, during 5 days, under advising of the researchers André Massafferri and Gilvan Augusto Alves. The main objectives of this course were to know and explore the necessary techniques in the detection of elementary particles, and to measure their physical properties. In this context we measure flux, velocity and mean lifetime of muons produced by cosmic ray showers. The results obtained are compatible with many existed measurements and serve as a proof that Special Relativity Theory provides the better description of systems involving large velocities.

Keywords: instrumentation - muons - flux - velocity - mean lifetime - high energy.

1. INTRODUÇÃO

O caráter absoluto da velocidade da luz, postulado por Einstein em 1905, teve sérias consequências no nosso entendimento do espaço e do tempo. Neste formalismo, o comprimento de um objeto ou a passagem do tempo não são iguais em diferentes referenciais inerciais. A razão de não percebermos isso antes, deve-se ao fato que tais fenômenos só são significativos em escala de altas velocidades, muito

*Electronic address: name@server.com

diferente da que vivemos no dia-a-dia. Para acessar estas escalas, neste trabalho utilizamos os raios cósmicos.

Raios cósmicos são gerados por partículas ou átomos estáveis, como prótons e núcleos de ferro, produzidos em corpos celestes, em um largo espectro de energia. Ao chegarem na alta atmosfera terrestre, essas partículas colidem com núcleos na atmosfera, resultando em uma série de interações que produzem uma cascata de partículas secundárias, fenômeno denominado chuva cósmica [1].

Uma das partículas produzidas nesses chuveiros cósmicos é o múon, resultante do decaimento do pión. Como os múons interagem fracamente e têm uma massa 206 vezes maior que a do elétron, tornam-se altamente penetrantes, uma vez que depositam pouca energia por ionização. Eles decaem em um elétron e dois neutrinos ao longo do seu percurso até o solo com vida-média da ordem de microsegundo.

Essas partículas são produzidas a aproximadamente 15 km da superfície da Terra com velocidades próximas a da luz, e fluxo de aproximadamente 220 múons por metro quadrado por segundo [2], o que resultaria, segundo a Mecânica Newtoniana, na existência de menos de 10^{-8} múons por metro quadrado por segundo na superfície da Terra.

Nesse trabalho mediremos o fluxo, a vida-média e a velocidade dos múons no Rio de Janeiro. O resultado dessas medidas nos permitirá verificar se o formalismo da Relatividade Restrita é mais adequado para explicar fenômenos envolvendo partículas de altas energias.

2. APARATO EXPERIMENTAL

2.1. Detectores

Nossos experimentos fazem uso de dois tipos de tecnologia, acoplados em um único detector: cintiladores e fotomultiplicadoras [3], acoplados entre si por intermédio de guias de onda. Cada experimento conta com um arranjo específico, conforme o objetivo da medida.

Um cintilador é um material que emite luz quando por este passa radiação ionizante, como múons. Isto ocorre porque o material absorve parte da energia da partícula incidente pelo mecanismo de excitação atômica, emitindo fótons em número proporcional à energia da partícula incidente. Esses *flashes* luminosos são transformados em sinais elétricos dentro das fotomultiplicadoras.

Uma fotomultiplicadora (*PhotoMultiplier tube*, PMT) transforma a luz em um pulso elétrico em dois estágios, conforme esquema da Figura 1.

Quando um fóton entra em um fotocátodo, ocorre o efeito fotoelétrico, já que este se encontra recoberto por um material alcalino. Em seguida, o elétron ejetado é dirigido por um campo e direcionado a um conjunto de dinodos. O arranjo está ligado por divisores resistivos a um potencial de alta tensão (HV), que incorporam um fator multiplicativo no número de elétrons acelerados em cada estágio.

O fato da fotomultiplicadora amplificar o número de elétrons ao longo dos seus estágios faz com que estejamos suscetíveis a identificação de elétrons indesejados oriundos de efeitos termoiônicos, os quais podem resultar em sinais

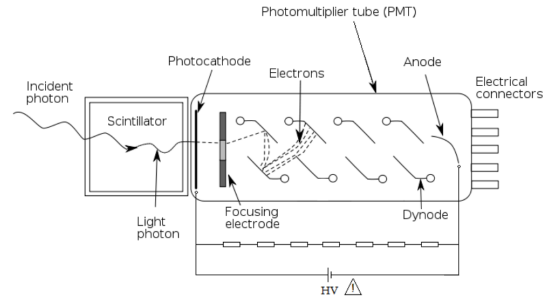


Figura 1: Esquema de funcionamento de um fotomultiplicador.

de saída similares a sinais produzidos por fótons externos. A tal efeito, denominamos *corrente de escuro* (CE).

2.2. Aquisição de Dados

O NIM é um padrão de aquisição de dados largamente utilizado em Física de Altas Energias, composto por uma série de módulos com diferentes finalidades dispostos em um *crate*. Nas Figuras 2 e 3 são mostrados alguns dos módulos utilizados neste trabalho; Módulo de Amplificação, o *Linear Fan in/out* para cópia de sinais analógicos, um módulo de *Delay*, o Discriminador, o módulo *Constant Fraction Discriminator* (CFD), *Digital Fan In/out*, dois módulos de Lógica e o contador. Temos ainda o *Gate Generator* e o *Time-To-Analog Digital Converter* (TADC). O primeiro tem um funcionamento parecido com um cronômetro, que é acionado quando identifica um pulso na entrada e para quando identifica um segundo pulso. Já o módulo TADC transforma atrasos relativos de dois pulsos digitais em um nível DC, que é posteriormente enviado ao computador na forma de um *byte*.

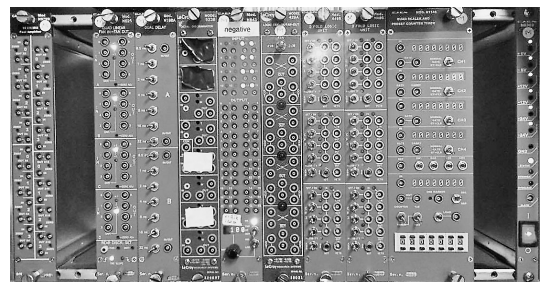


Figura 2: Unidade de aquisição padrão NIM utilizada neste trabalho.

Para eliminar ruído eletrônico, com média de amplitude tipicamente inferior ao sinal de interesse, o módulo discriminador compara sinais analógicos provenientes de detectores com uma tensão limiar, V_{th} , gerando na saída um pulso digital com largura configurável. Um tipo especial de discriminador que também utilizaremos neste trabalho são *Constant-Fraction Discriminator*, CFD. Neste módulo, o pulso digital é gerado com atraso constante em relação ao sinal de entrada, independente de sua amplitude. Assim, esperamos acionar os "relógios" sempre ao mesmo tempo, independente da energia do múon.



Figura 3: Módulos Gate Generator e TADC.

Para garantir que um evento é decorrente da passagem de um múon, aproveitamos o fato que tanto o ruído eletrônico como a corrente de escuro geram sinais aleatórios no tempo, sendo estatisticamente improvável a aparição conjunta em uma janela pequena de tempo. Essa técnica é conhecida como técnica de coincidência e é implementada pelo módulo de Lógica. Nele, selecionando o critério AND, é gerado um pulso de saída sempre que observamos a coincidência temporal entre diferentes sinais. O pulso digital proveniente da utilização de um critério de lógica *booleana* aplicado em sinais digitalizados e, portanto, formando uma amostra com baixa incidência de ruído eletrônico, pode ser utilizado como definição de um evento físico para ser armazenado e analisado posteriormente. Esse pulso tem grande importância em qualquer arranjo experimental em Física de Altas Energias e é denominado de *Trigger*.

O sistema de aquisição de dados do padrão VME é o responsável pela automatização do processo. Essa unidade será utilizada em conjunto com NIM para tomada automática de dados, já que possui interface com o computador. Utilizaremos programas em linguagem C, para seu controle, e o *software* ROOT [4], desenvolvido pelo CERN, para tratamento de dados. Neste trabalho, conforme mostrado na Figura 4 utilizaremos, no padrão VME, os módulos TDC (*Time-Digital Converter*), módulo de interface e um módulo de proposta múltipla, contendo uma unidade de programação em *hardware* denominado FPGA, onde foi implementado um conversor entre pulsos digitais simples para diferenciais. O módulo TDC, apesar de funcionar de forma diferente que o TADC, ele tem a mesma função, oferecendo resolução temporal de 25 picosegundos.

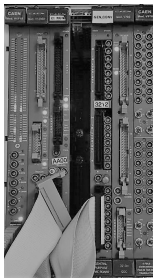


Figura 4: Módulos VME utilizados neste trabalho.

3. METODOLOGIA

Para a medida do fluxo de múons cósmicos no Rio de Janeiro, utilizamos detectores contendo cintiladores plásticos de geometria quadrada acoplados a fotomultiplicadores através de guias de onda. O método de seleção dos múons é feito pela coincidência entre dois detectores posicionados na vertical e pela comparação da amplitude do sinal gerado com uma tensão de referência (V_{th}). Utilizamos um terceiro detector, também de geometria quadrada mas de dimensões menores, com a finalidade de medir a eficiência dos detectores principais.

Primeiramente, posicionamos os detectores A e B, de 400 cm^2 de área, de forma que ficassem aproximadamente um sobre o outro, e o auxiliar, de 49 cm^2 , entre A e B (Figura 5). A distância entre os detectores principais é de $11,3 \text{ cm}$. O detector auxiliar é posicionado de tal forma que todas as trajetórias de múons que passem pelo detector A e pelo auxiliar também passe pelo detector B, lembrando que a incidência de múons é aproximadamente proporcional ao quadrado do cosseno do ângulo azimutal, θ , [citepiazzoli]. Esse comportamento é obtido empiricamente e varia de acordo com a região.

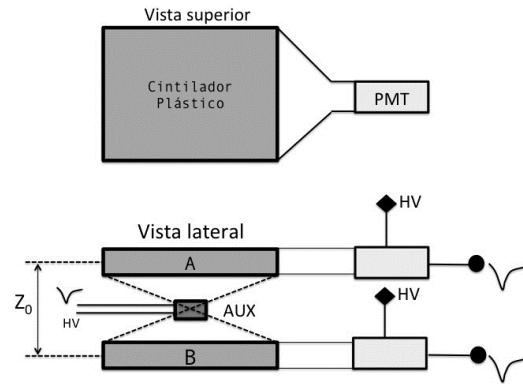


Figura 5: Arranjo experimental dos detectores.

Na Figura 6, é apresentado o *setup* utilizado no *crate* NIM. O sinal gerado em cada detector pela passagem de um múon segue para um discriminador, depois para um *Fan-in/Fan-out* e, em seguida, para uma unidade lógica. Em cada canal da unidade de lógica pudemos fazer a combinação dos sinais para avaliar as coincidências. Por fim, cada janela está ligada a um contador.

Buscando determinar a melhor tensão de operação das fotomultiplicadoras, realizamos um processo que é conhecido como *platonagem*. Para a *platonagem* do fotomultiplicador do detector A, fixamos a voltagem de B em 1700 V e variamos a de A na faixa de 1200 V a 1900 V , com intervalos de 100 V . Para o detector B, fixamos a voltagem de A em 1700 V e variamos a de B na mesma faixa anterior e com o mesmo intervalo. As coincidências de A e B ($\text{COINC}[A \& B]$) para os diferentes valores de tensão estão representadas nas Figuras 7 e 8. Em ambos os casos os discriminadores foram configurados para operarem com uma tensão de limiar de -30 mV e uma largura de pulso de 40 ns .

Pelas Figuras 7 e 8, podemos notar que há uma região plana em torno de 1800 V , onde a eficiência é máxima. Den-

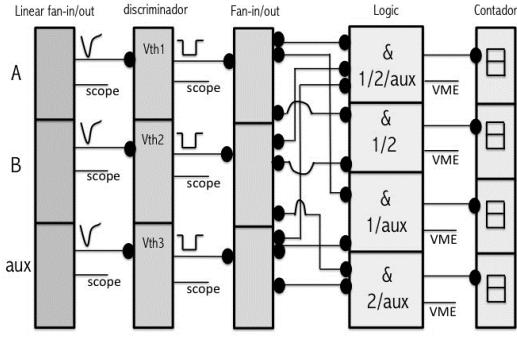


Figura 6: Setup para a medida do fluxo de múons através do crate NIM.

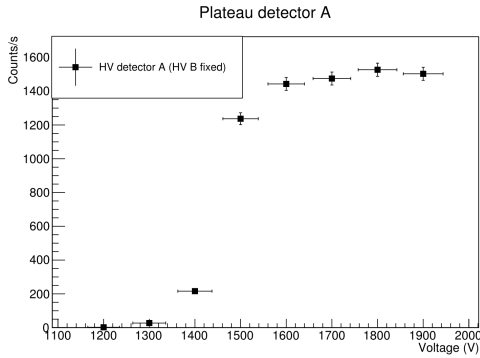


Figura 7: Plateau da PMT do detector A.

tro da região plana escolhemos a que apresenta o menor valor de alta tensão, já que a corrente de escuro aumenta com a alta tensão.

A medida de fluxo se refere a uma contagem por tempo por unidade de área. O fato da contagem que estamos realizando utilizar dois detectores implica em realizar a contagem em um certo volume. A aceitação A_b é uma correção que devemos fazer para converter o volume em uma área e vem do fato de que múons que incidem com determinado ângulo θ , não geram pulsos coincidentes nos detectores A e B. A_b é calculada por meio de uma simulação Monte Carlo. A simulação leva em conta a distância entre os detectores, suas áreas e a dependência da distribuição angular do fluxo de múons incidentes com $\cos^2 \theta$.

O fluxo de múons (ϕ) é dado pela seguinte equação:

$$\phi (s^{-1} \cdot m^{-2}) = \frac{\text{COINC [A \& B]}}{\text{área} \cdot \text{tempo aquisição} \cdot A_b \cdot \text{Eff}_A \cdot \text{Eff}_B} \quad (1)$$

em que Eff_A e Eff_B são as eficiências dos detectores A e B, respectivamente, e são obtidas pelas seguintes expressões:

$$\text{Eff}_A = \frac{\text{COINC [A \& B \& AUX]}}{\text{COINC [B \& AUX]}} \quad (2)$$

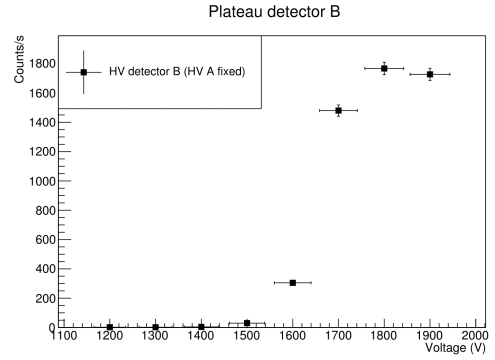


Figura 8: Plateau da PMT do detector B.

$$\text{Eff}_B = \frac{\text{COINC [A \& B \& AUX]}}{\text{COINC [A \& AUX]}} \quad (3)$$

Foi realizada uma tomada de dados de 120 segundos e contagens para cada janela do módulo lógico. Em seguida, variamos a distância entre os detectores para 60,5 cm com a finalidade de obter um meio de estimar o erro sistemático decorrente de variações do modelo de incidência de múons no Rio de Janeiro. Para a distância de 11,3 cm, o fator de correção (A_b) encontrado foi de 0,79548 e para a distância de 60,5 cm 0,35113. O erro da correção é desprezível já que a simulação foi realizada com 10M eventos.

Após realizarmos as contagens com o NIM, voltamos à distância anterior de 11,3 cm para fazermos contagens com o sistema de aquisição VME. Realizamos dois tipos de tomada de dados: 900 tomadas de 12 segundos e 90 tomadas de 120 segundos. As Figuras 9 e 10 representam os histogramas das coincidências das janelas da unidade lógica para cada tipo de tomada de dados e a Tabela II as medidas do fluxo.

Para o cálculo das eficiências utilizamos os resultados obtidos para 900 tomadas de 120 segundos. O valor obtido para a eficiência de A foi de $(0,9116 \pm 0,0087)$ e para a eficiência de B $(0,7617 \pm 0,0069)$.

Existe a possibilidade de ocorrência de coincidências casuais, provocadas por eventos incoerentes, como ruído eletrônico, corrente de escuro e por dois múons incidentes em 2 detectores distintos. A probabilidade de coincidências casuais, P_{casual} [6], para as coincidências triplas e para as 3 coincidências duplas utilizadas nesta medida podem ser calculadas por:

$$P_{\text{casual}}(\text{COINC [A \& B \& AUX]}) = 3 \cdot \frac{C[A] \cdot C[B] \cdot C[AUX]}{\text{COINC [A \& B \& AUX]}} \cdot T^2 \quad (4)$$

$$P_{\text{casual}}(\text{COINC [B \& AUX]}) = 2 \cdot \frac{C[B] \cdot C[AUX]}{\text{COINC [B \& AUX]}} \cdot T \quad (5)$$

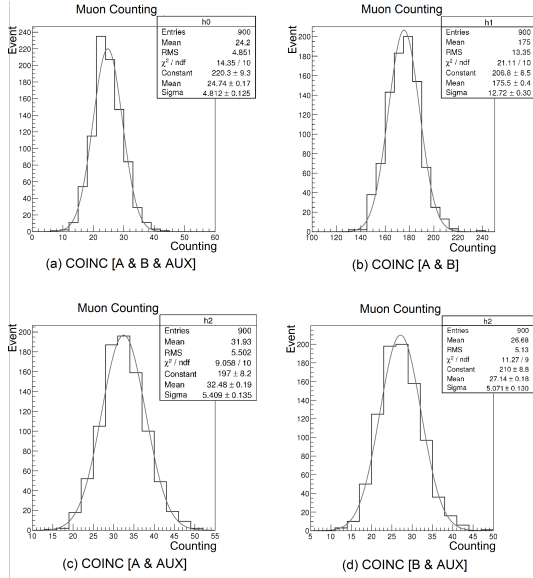


Figura 9: Histogramas das coincidências de cada janela para 900 tomadas de 12 segundos.

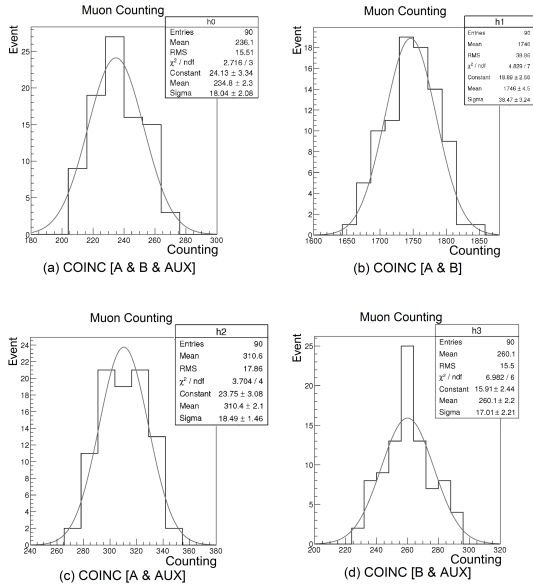


Figura 10: Histogramas das coincidências de cada janela para 90 tomadas de 120 segundos.

$$P_{\text{casual}}(\text{COINC [A \& AUX]}) = 2 \cdot \frac{C[A] \cdot C[AUX]}{\text{COINC [A \& AUX]}} \cdot T \quad (6)$$

$$P_{\text{casual}}(\text{COINC [A \& B]}) = 2 \cdot \frac{C[A] \cdot C[B]}{\text{COINC [A \& B]}} \cdot T \quad (7)$$

onde $C[A]$, $C[B]$ e $C[AUX]$ se referem a contagens simples. Obtivemos, respectivamente, as probabilidades $3,05 \cdot 10^{-5}$, 0,01, 0,07 e 0,01, as quais podem ser desprezadas.

Na Figura 11 apresentamos o gráfico do resultado final obtido. As medidas B, C e D foram realizadas como um meio de estimar o erro sistemático. Para a estimativa do fluxo de múons utilizamos a medida de A por ter uma incerteza menor.

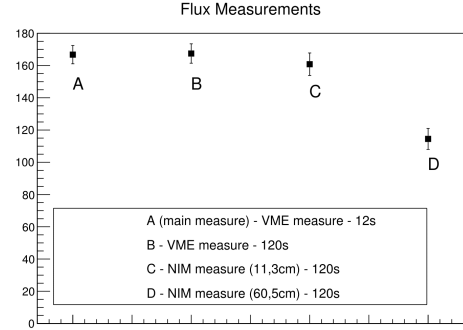


Figura 11: Medidas do fluxo de múons.

Os resultados referentes as tomadas de dados NIM e VME se encontram nas Tabelas I e II.

z_0 (cm)	$\phi(s^{-1} \cdot m^{-2})$
11,3	$160,83 \pm 6,97$
60,5	$114,50 \pm 6,46$

Tabela I: Medidas obtidas com o NIM para 120 segundos de tomada de dados.

T (s)	$\phi(s^{-1} \cdot m^{-2})$
12	$166,76 \pm 5,67$
120	$167,46 \pm 6,01$

Tabela II: Medidas obtidas com o VME para $z_0 = 11,3$ cm.

A medição do fluxo de múons obtido é mostrado na expressão 8.

$$\phi = (166,76 \pm 5,67^{+0,70}_{-52,26}) s^{-1} \cdot m^{-2} \quad (8)$$

3.1. Medida da velocidade de múons cósmicos

Para determinar a velocidade dos múons utilizamos a técnica de tempo de voo. Detectamos a passagem de um mesmo múon por dois cintiladores, posicionados em alturas distintas, e medimos o tempo entre as detecções. Assim, sabendo a distância entre os cintiladores conseguimos calcular sua velocidade. Como a velocidade dos múons cósmicos se aproxima da velocidade da luz precisamos ter incertezas da ordem de 1 mm, para medidas de distância, e de picosegundo para medidas de tempo.

Para evitar que diferenças determinísticas nos caminhos dos sinais referente aos dois detectores, devido principalmente a comprimento de cabos, prejudiquem a medida, realizamos várias medidas, sempre com um detector móvel e

outro fixo. Assim, essas diferenças não se refletem na medida da velocidade, a qual é obtida pela inclinação da reta no gráfico *distância entre detectores* $\times$ *diferença de tempo de chegada dos sinais*. Essa técnica é também explorada em [7].

Algumas incertezas, no entanto, não são determinísticas, como as descritas acima, nem são aleatórias, como fenômenos de *jitter* no sistema de aquisição de dados e variações ocasionados pela resolução do módulo TDC pois dependem do ângulo de incidência dos traços dos múons. Identificamos dois tipos de fontes de incertezas deste tipo: (i) utilização da distância vertical entre detectores para representar o caminho inclinado entre os múons, uma vez que os detectores utilizados não são pontuais e (ii) dependência da posição de chegada dos múons nos cintiladores ocasionada por diferentes trajetórias dos fótons até as fotomultiplicadores. Essas duas fontes de erro sistemático são minimizadas ao se utilizar detectores de dimensões relativamente pequenos. O eventual aumento do erro estatístico pode ser compensado por tomadas de dados mais longas.

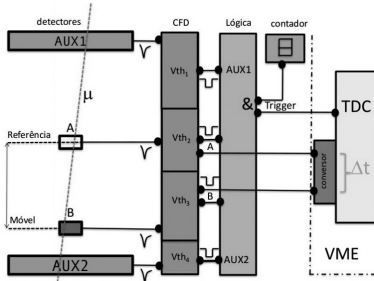


Figura 12: Esquema experimental da medida de velocidade dos múons.

Utilizamos quatro cintiladores quadrados, dois principais de 7cm de lado e outros dois auxiliares de 20 cm de lado. O *trigger* consiste na coincidência entre os quatro detectores. Os sinais dos cintiladores principais são enviados para um discriminador CFD, que gera um pulso o qual é processado pelo módulo TDC, convertendo a diferença de tempo entre os sinais em um *byte* para o computador. Foram realizadas medidas para 5 alturas diferentes, cada uma com em torno de 500 eventos. A montagem é mostrada na Figura 13 com o valores das posições do detector móvel descritos na Tabela III.

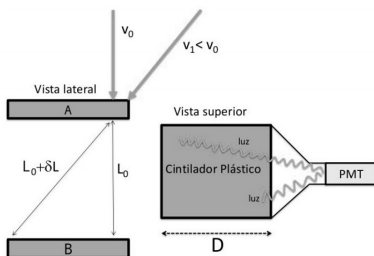


Figura 13: Montagem experimental da medida da velocidade de múons.

Com os dados coletados foram produzidos os histogramas das Figuras 14 e 15 representando medidas de atraso relativo entre os 2 detectores principais.

Medida	Posição do cintilador móvel (cm)	Δh (cm)
01	29,9	1,81
02	59,7	29,9
03	199,1	169,2
04	89,2	59,4
05	159,3	129,5

Tabela III: Posição dos cintiladores.

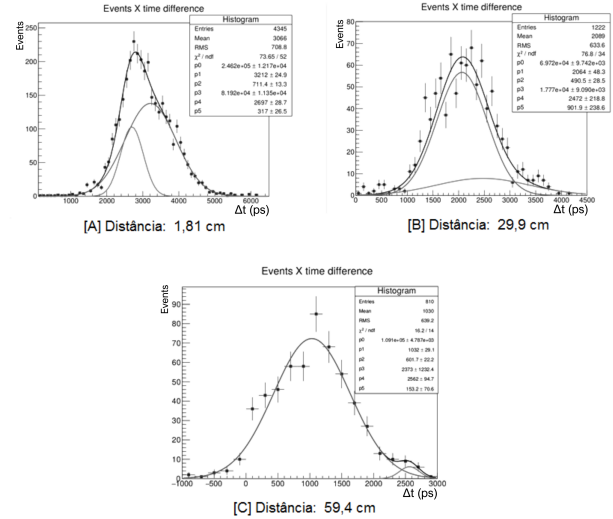


Figura 14: Diferenças de tempo entre os detectores principais.

Para o caso ideal, onde os eventos que envolvem múons com trajetórias inclinadas terem sido eliminados era de se esperar um comportamento gaussiano. No entanto, a verticalidade não foi absoluta. Isso implica que os eventos para uma certa altura entre os cintiladores não tiveram todos a mesma distância percorrida pelas partículas. Para levar em conta esse efeito decidimos ajustar os dados utilizando duas gaussianas, uma representando o caso ideal e a outra para ajustar a contribuição dos efeitos sistemáticos descritos acima.

Como pode ser visto nos resultados da Figura 16, a forma proposta para separar a contribuição principal da anômala é consistente. Quanto maior a distância entre os cintiladores, mais difícil a ocorrência de eventos com certa angulação. Desse modo, menor também seria o erro sistemático para esses casos e menos expressiva seria a gaussiana secundária. Como podemos observar, para a menor altura (1,81 cm) as duas gaussianas possuem um valor médio bem diferente e a secundária não é irrelevante. Na segunda menor altura (29,9 cm), a gaussiana principal possui também um valor médio diferente da outra, mas esta já não é tão expressiva. Para as demais alturas, vemos que os valores médios convergem entre si ou a gaussiana secundária não contribui.

Utilizamos como modelo alternativo, mostrado na Figura 17, o qual está incluído na computação do erro sistemático, a utilização do valor médio e da RMS de cada distribuição, sem envolver ajuste.

Encontramos resultados, expressão 9 compatíveis entre si e com o valor esperado, tendo em vista outras evidências experimentais e modelos semi-empíricos.

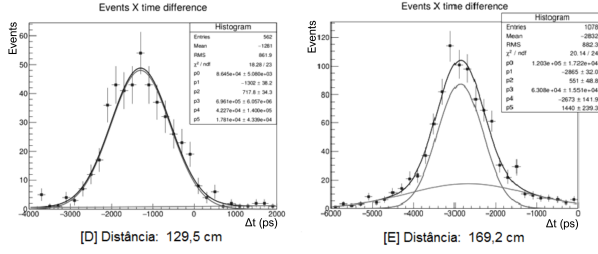


Figura 15: Diferenças de tempo entre os detectores principais.

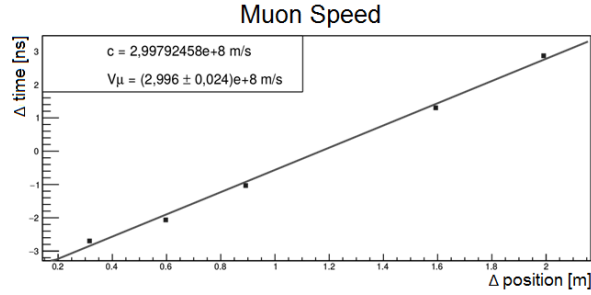


Figura 16: Velocidade dos múons utilizando a gaussiana principal.

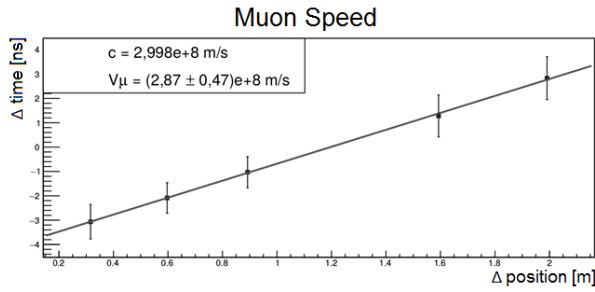
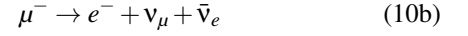
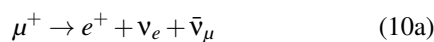


Figura 17: Velocidade dos múons utilizando a média da distribuição e RMS como incerteza.

$$v = (2,996 \pm 0,024) \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (9)$$

3.2. Medida da vida-média de múons

Múons são produzidos na alta atmosfera preferencialmente a partir do decaimento de píons. Ao atravessarem a atmosfera viajando com velocidade próxima à da luz, essas partículas perdem em média 2 GeV de energia. Para μ^+ (μ^-) com energia menor que este limiar, existe a possibilidade de ele decair emitindo um pósitron e^+ (elétron e^-), neutrino do elétron ν_{e^-} (neutrino do múon ν_μ) e um antineutrino do múon $\bar{\nu}_\mu$ (antineutrino do elétron $\bar{\nu}_{e^-}$), como mostrado na Equação (10a) e Equação (10b).



Podemos descrever o comportamento do número de múons (N) em função do tempo (t) por uma distribuição exponencial (equação (11)), uma vez que a probabilidade de decaimento do múon não depende do tempo que o mesmo já viveu.

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

N_0 representa o número de múons considerando o tempo inicial t igual a 0. Definimos como tempo de vida-média τ , o tempo para o qual o número de múons decresce em $\frac{1}{e}$, ou seja, $N(\tau) = N_0 e^{-1}$.

Nesse experimento, medimos o tempo de vida-média dos múons na cidade do Rio de Janeiro. Para isso, medimos a diferença de tempo entre o sinal do múon e o sinal do elétron proveniente do decaimento deste. Para isso, utilizamos um cintilador líquido a base de óleo mineral de densidade $\approx 1 \text{ g/cm}^3$, o que representa uma energia necessária para atravessá-lo de cerca de 70 MeV [8]. Múons com energia inferior a esse valor são freados e possuem uma alta probabilidade de decaírem dentro do líquido cintilador. Assim, a partir destes valores de intervalo de tempo foi calculada a vida-média da partícula em questão.

Vale ainda ressaltar que ao atravessarem o tanque, múons negativos podem ser capturados por núcleos atômicos do líquido cintilador, substituindo os elétrons deste. Tal fenômeno não foi levado em consideração no presente experimento pois a carga não foi discriminada. Isso leva a determinação de um valor de vida-média ligeiramente menor que o esperado, pois estamos, na verdade, medindo o efeito total desse fenômeno na vida-média.

O aparato utiliza um tanque cilíndrico de 35 cm de altura por 30 cm de diâmetro para abrigar o cintilador líquido e fonte de alta tensão (HV) que alimenta o fotomultiplicador acoplado ao tanque, cobertos com um material plástico com o objetivo de impedir a interferência da luz externa nas medições. A figura 18 ilustra um múon μ penetrando no tanque cilíndrico preenchido com o cintilador e decaindo em elétron e^- . O cintilador absorve a energia do múon seguindo da interação do elétron, emitindo em ambos os casos fótons que são transformados em sinal elétrico pelo fotomultiplicador. O sinal segue para o DAQ padrão NIM, onde será montado um circuito para transformar os sinais em dados de tempo de decaimento dos múons. Por fim, os dados serão encaminhados para um computador que os transformará em um gráfico de número de múons por tempo.

Esse sistema deve ser capaz de medir a vida-média do múon. Para isso, ele deve iniciar um relógio quando o múon penetra no tanque e pará-lo quando o múon decai. Além disso, múons que passam pelo cintilador e não decaem não devem ser contabilizados. O circuito montado para esse experimento está representado na figura 19. A seguir está detalhado de forma esquemática o funcionamento desse circuito.

1. Sinais analógicos gerados pelo detector proveniente da

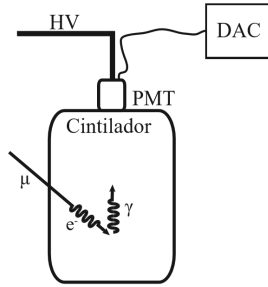


Figura 18: Diagrama do setup do experimento de detecção de vida-média do múon.

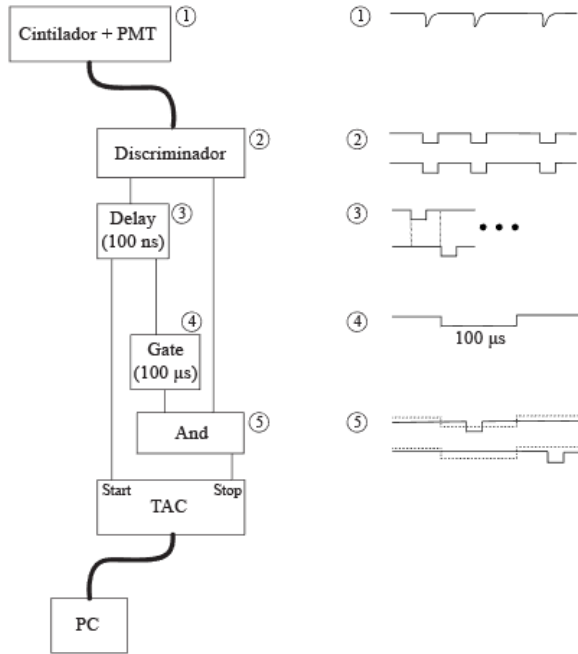


Figura 19: A esquerda: Diagrama de blocos do circuito do DAQ. A direita: representação didática do sinal em cada um dos componentes do circuito montado no DAQ.

detecção de partículas carregadas.

2. Sinais analógicos são transformados em digitais e duplicados no discriminador, o primeiro módulo do DAQ.
3. Um dos sinais segue para o módulo que confere um atraso de 100 ns ao sinal, gerando o pulso de (*start*) no relógio da TAC e abrindo um gate de $100\text{ }\mu\text{s}$.
4. A porta AND compara esse sinal com um segundo sinal que chega no DAQ. Caso esse sinal seja detectado em um tempo inferior ao tempo de abertura da GATE, o relógio da TAC é parado (*stop*), criando um nível DC proporcional ao tempo entre os dois pulsos. Este nível é convertido por um ADC embutido no TADC, e enviado ao computador na forma de *byte*. É esperado que esse segundo sinal tenha sido gerado por um elétron decaído do múon.

Vale lembrar que se não houvesse o atraso, o mesmo sinal que abriria a GATE e iniciaria o relógio da TAC, iria ime-

diatamente pará-lo, assim, a medida não seria devidamente realizada.

O tempo de GATE é selecionado de forma a tornar improvável que um sinal não proveniente do decaimento do múon pare o relógio. Por exemplo, caso um segundo múon penetre no cintilador antes que o primeiro múon decaia, ele irá parar o relógio da TAC, contabilizando uma contagem de decaimento, mesmo não tendo de fato acontecido o decaimento do primeiro múon. A probabilidade de dois múons penetrarem no tanque em um intervalo de $100\text{ }\mu\text{s}$ é de aproximadamente 0.04% . O mesmo acontece para qualquer flutuação na eletrônica que gere um sinal de início ou parada do relógio da TAC levando a uma contagem errada.

Assim, a informação transmitida para o computador pelo DAQ é o número de contagens por *canal-ADC*. O número de contagem se relaciona com o número de múons, e o *canal-ADC* relaciona-se com o tempo que um múon demorou para decair. Foram feitas medições ao longo de aproximadamente dois dias. Utilizamos um programa escrito em C para transformar os dados obtidos em um histograma apresentado na figura 21.

Antes de serem iniciadas as medições, foi realizada uma calibração do módulo de aquisição de dados. Foi verificada a linearidade do número do canal-ADC com a diferença de tempo registrada. A figura 20 representa os dados obtidos.

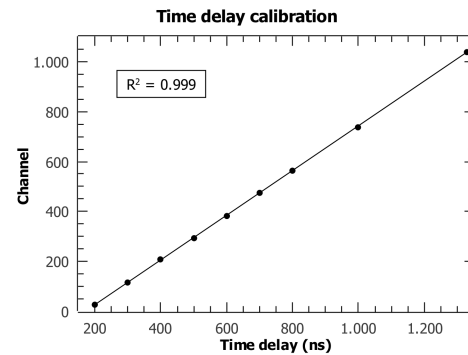


Figura 20: Gráfico dos dados obtidos durante a calibração do módulo.

A análise do gráfico representado na figura 20 evidencia a linearidade entre o número do channel e o tempo de atraso. Com isso, para contruirmos um gráfico do número de múons em função do tempo, basta medirmos as contagens no detector em função do canal-ADC.

Na Figura 21 está representado um histograma de contagens em função do tempo, com a qual foi realizado o ajuste da vida-média com um exponencial decrescente, a partir da equação 11, adicionando uma função linear para parametrizar os eventos indesejados, como aqueles cujo GATE são iniciados por um múon e terminados por outro.

O valor encontrado para a vida-média do múon foi de:

$$\tau = (2,07 \pm 0,32)\mu\text{s} \quad (12)$$

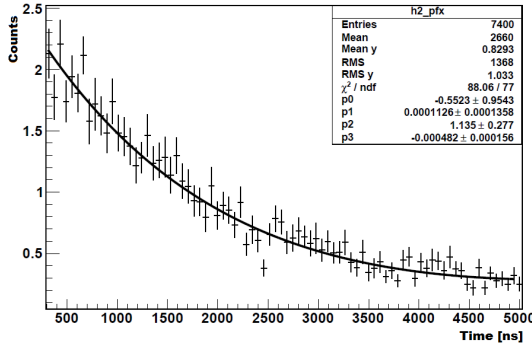


Figura 21: Medida da vida-média dos múons, onde p3 é o inverso da vida-média.

4. CONCLUSÕES

A medida da velocidade média dos múons no Rio de Janeiro foi de $(2,996 \pm 0,024) \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, isto corresponde a um fator relativístico, β , $0,999 \pm 0,008$, que está de acordo com os valores aceitáveis $\beta_{ac} = 0,994 - 0,998$ [9], depen-

dendo da fonte de literatura. Podemos dizer então que um valor tão grande de β descreve um fenômeno puramente relativístico. A medida da vida-média do múon realizada, tendo sido obtido o valor de $(2,07 \pm 0,32)\mu s$, em consistência com os da literatura, $\tau_{ac} = 2,197 \mu s$ [10], tendo em vista que não discriminamos os múons segundo sua carga.

À luz da Mecânica Newtoniana, tendo em vista os valores obtidos neste trabalho para a velocidade e vida-média de múons na cidade do Rio de Janeiro, o número esperado de múons é da ordem de 10^{-8} . A medida do fluxo de múons foi também realizada e o resultado obtido foi $\phi = 166,76 \pm 5,67^{+0,70}_{-52,26} s^{-1}m^{-2}$, compatível com o previsto pela teoria da Relatividade Especial, da ordem de 10^2 . A existência de múons no nível do mar confirma os efeitos da dilatação do tempo (ou contração do espaço, dependendo do referencial) previstos pela Relatividade Especial.

Neste trabalho tivemos amplo acesso a ferramentas e instrumentação padrão a Altas Energias, o que é extremamente importante para conhecermos a física realizada em centros de pesquisa em Física de Partículas.

-
- [1] review pdg.lbl.gov, chapter 24, 2016.
- [2] Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 585-591 (2007).
- [3] Photomultiplier Tubes, principles and application, Reedited September 2002 by S.O. Flyckt and Carole Marmonier, Photonis, Brive, France.
- [4] R. BRUN and F. RADEMAKERS, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86. See also <http://root.cern.ch/>
- [5] Aperture and Counting Rate of Rectangular Telescopes for Single and Multiple Parallel Particles, B. D Ettore Piazzoli and G. Mannocchi, Nuclear Instruments and Methods, 135 (1976), 223-233.
- [6] S. C. Curran and J. D. Craggs, Counting Tubes, Theory and applications, (1949).
- [7] Measurement of the Speed and Energy Distribution of Cosmic Ray Muons, Grant Remmen and Elwood McCreary, Journal Of Undergraduate Research in Physics, 7 february 2012, MS138.
- [8] The Speed and Decay of Cosmic Ray Muons: Experiments in the Relativistic Kinematics of the Universal Speed Limit and Time Dilation, note of MIT department of Physics (13 november 2013)
- [9] L. LIU, *The Speed and Lifetime of Cosmic Ray Muons*, MIT, November 2007
- [10] National Inst. of Standards and Technology. Online Database, <http://physics.nist.gov>, 2007