



# CORREÇÕES DA RELATIVIDADE RESTRITA NO PROBLEMA DO DECAIMENTO DO MÚON: UMA REVISÃO CONCEITUAL

Pablo Julliano Gomes Fntenelle<sup>1</sup> e Mikael Souto Maior de Sousa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Colégio de Aplicação da UFRR – Universidade Federal de Roraima (UFRR)  
CEP – 69.310-000 – Boa Vista – RR – Brasil

<sup>2</sup> Colégio Militar de Fortaleza – Comando do Exército  
CEP – 60.115-000 – Fortaleza – CE – Brasil

{[mikael.souto@ufrr](mailto:mikael.souto@ufrr), [pablojulliano22@gmail.com](mailto:pablojulliano22@gmail.com)}

**Abstract.** *The relativity principle of Galileo Galilei describes the particle motion from a reference system. Newton, on the other hand, starting from the Galileo principle, formulated Newton's laws used in classical mechanics. For both Galileo and Newton, the space (formed by 3 dimensions) and the time were independent and absolute terms. The time being immutable for any inertial frame, perfectly describing the movement of particles at very low speeds when compared to the speed of light. Einstein formulated the Theory of Relativity forming the concept called space-time, where it has 4 dimensions (the 3 spatial dimensions and the time), describing the movement of particles with speeds comparable to the speed of light, just where Newton's theory failed. This proposition led to several technological advances that are present in our daily lives, even if we don't realize it, as is the case of the Global Positioning System (GPS). This article aims to describe the process of muon decay on the Earth's surface, using the Theory of Special Relativity, proposed by Einstein in 1905. Thus, this problem about muon decay shows itself as an experimental proof of relativistic effects proposed by Einstein.*

**Keywords:** *Relativity, modern physics, muons.*

**Resumo.** O princípio da relatividade Galileu Galilei descreve o movimento de uma partícula a partir de um sistema de referência. Newton, por sua vez, partindo também do princípio de Galileu, formulou as leis de Newton usadas na mecânica clássica. Tanto para Galileu, como para Newton, o espaço (formado por 3 dimensões) e o tempo eram termos independentes e absolutos. Sendo o tempo imutável para qualquer referencial inercial, descrevendo perfeitamente o movimento de partículas para velocidades muito baixas quando comparadas com a velocidade da luz. Einstein formulou a Teoria da Relatividade formando o conceito chamado espaço-tempo, onde o mesmo possui 4 dimensões (as 3 dimensões espaciais e o tempo), descrevendo o movimento de



partículas com velocidades comparáveis com a velocidade da luz, justo onde a teoria de Newton falhava. Tal proposição levou a diversos avanços tecnológicos que estão presentes em nosso cotidiano mesmo que não percebamos, como é o caso do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Este artigo tem como objetivo descrever o processo de decaimento de múons na superfície da Terra, usando a Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Einstein em 1905. Dessa forma, esse problema sobre o decaimento de múon mostra-se como uma comprovação experimental dos efeitos relativísticos propostos por Einstein.

**Palavras-chave:** Relatividade, física moderna, múons.

## 1. Introdução

Quem introduziu o princípio da relatividade foi Galileu Galilei, ao notar que para descrever o movimento de uma partícula é necessário adotar um sistema de referência. Logo depois, Newton usou o princípio de Galileu para formular as leis de Newton usadas na mecânica clássica. Tanto para Galileu, como para Newton, o espaço (formado por 3 dimensões) e o tempo eram termos independentes e absolutos. Sendo o tempo imutável para qualquer referencial inercial (FERRARO, 2007; LEÃO, 2019; THORNTON, 2012).

No início do século XX Einstein formulou a Teoria da Relatividade. Ao invés de considerar o espaço e o tempo termos independentes, Einstein uniu os dois formando o conceito chamado espaço-tempo, onde o mesmo possui 4 dimensões (as 3 dimensões espaciais e o tempo). Em 1905 foi publicada a teoria da relatividade especial, na qual não incluía os efeitos gravitacionais para descrever o movimento de partículas com velocidades comparáveis com a velocidade da luz, descrevendo então o princípio da relatividade onde o sistema de referência se encontra em movimento uniforme (RIFFEL, 2019).

Um fenômeno físico pode ser descrito como uma sequência de eventos físicos. Estes são definidos como um elemento de algum fenômeno que ocorre em determinado espaço em um determinado instante de tempo. Mas ao analisarmos o espaço, precisamos adotar um sistema de referência, que pode ser definido por um sistema de eixos, nos quais as posições em que o evento ocorre serão indicadas. Ou seja, para descrever um fenômeno físico é necessário um sistema de referência (FERRARO, 2007; FERRARO, 2009; LEÃO, 2019; THORNTON, 2012).

Pode-se dizer que, analisando uma partícula, notar-se-á diferentes movimentos para diferentes sistemas de referência, ou seja, o seu comportamento não será o mesmo para diferentes referenciais. De acordo com a primeira lei de Newton, uma partícula livre estará sempre em repouso ou em movimento uniforme em um referencial inercial. Falando de outra forma, um referencial inercial é um referencial onde é possível observar as três leis de Newton (FERRARO, 2007). A partir de um referencial inercial é possível achar infinitos referenciais inerciais. Qualquer referencial que se movimente



com velocidade constante em relação a um referencial inercial, também é considerado um referencial inercial, porém qualquer referencial que tenha uma velocidade variável em relação a um referencial inercial, é considerado um referencial não inercial.

A teoria da relatividade especial ou restrita, publicada em 1905 por Albert Einstein, discute fenômenos que envolvem sistemas de referências inercias, propondo a não existência de um sistema de referência universal. Em sua teoria, foram determinados 2 postulados (FERRARO et al, 2009).

O primeiro postulado da teoria da relatividade especial afirma que as leis da física são idênticas em relação a qualquer referencial inercial (FERRARO et. al, 2009). Esse postulado é mais geral que o de Galileu, que se referia apenas às leis da Mecânica, ao considerar que os fenômenos físicos são, nas mesmas condições, idênticos em todos os sistemas de referenciais inerciais (FERRARO et. al., 2009). Segundo postulado da teoria da relatividade especial: A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite no universo (FERRARO et. al., 2009).

Dentro dessa temática, este trabalho aborda o fenômeno do decaimento do múon, na alta atmosfera terrestre, como comprovação experimental dos efeitos relativísticos propostos por Einstein em sua teoria da relatividade restrita. E mostraremos que, como o múon chega a superfície terrestre com velocidades comparáveis a velocidade da luz, os efeitos relativísticos no tempo e no espaço devem ser considerados, teoricamente, para que possamos explicar o fenômeno de detecção experimental desses múons que chegam a nossa superfície.

Múons são partículas elementares estáveis, as quais são produzidas na atmosfera terrestre. Quando um raio cósmico de alta energia colide com núcleos de moléculas presentes na atmosfera terrestre, origina uma sequência de interações nucleares e eletromagnéticas, formando uma cascata de partículas, cujas velocidades são próximas a da luz, conhecida como Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) (CONSALTER *et al.*, 2010).

O número de partículas de um CAE, ao nível do mar, pode alcançar dezenas de milhares de partículas, e a componente muônica pode representar até 15% do total de partículas carregadas. Essa previsão teórica só foi possível partindo da Teoria da Relatividade Restrita.

## 2. Metodologia

Este trabalho segue a metodologia de pesquisa baseada na revisão de literatura de maneira integrativa. Isto é, surgiu como alternativa para revisar rigorosamente e combinar estudos com diversas metodologias, por exemplo, delineamento experimental e não experimental, e integrar os resultados. Tendo o potencial de promover os estudos de revisão em diversas áreas do conhecimento, mantendo-se o rigor metodológico das revisões sistemáticas. O método de revisão integrativa (CARVALHO *et. al.*, 2010) permite a combinação de dados da literatura empírica e teórica que podem ser direcionados à definição de conceitos, identificação de lacunas nas áreas de estudos, revisão de teorias e análise metodológica dos estudos sobre um determinado tópico. A

combinação de pesquisas com diferentes métodos combinados na revisão integrativa amplia as possibilidades de análise da literatura.

## 2.1. A relatividade na mecânica clássica

A relatividade de Galileu, é uma relação onde as grandezas físicas são transformadas de um referencial inercial para outro referencial inercial usando os fundamentos da mecânica clássica. Para analisar como essas grandezas variam de um referencial inercial para outro, adotaremos um sistema de referência  $O$  e  $O'$ . Nesses referenciais,  $O$  e  $O'$ , teremos os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ , respectivamente, como mostra a Figura 1.

Fonte: Marion (2012)

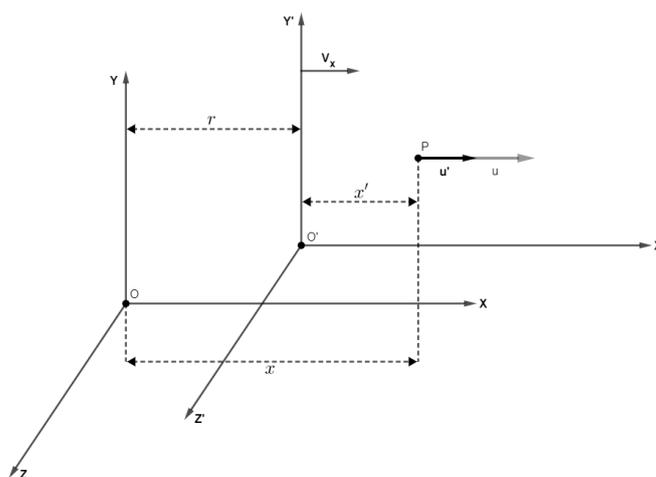


Figura 1: Movimento da partícula ao longo da linha horizontal, observado a partir de referenciais inerciais distintos  $O$  e  $O'$ , com velocidade relativa entre si.

Assim a transformação entre os referenciais inerciais  $O$  e  $O'$  se dá através do sistema de equações abaixo, onde levamos em consideração que o tempo é absoluto e imutável (LEÃO, 2019) para qualquer referencial inercial segundo afirma Newton e Galileu.

$$x' = x - V_x \cdot t, \quad (1)$$

$$y' = y, \quad (2)$$

$$z' = z, \quad (3)$$

$$t' = t. \quad (4)$$

Considerando que a partícula se movimenta com velocidade direcionada somente ao longo do eixo  $x$ . Adota-se uma partícula situada num ponto  $P$ , com velocidade  $u$  em relação ao sistema de referência  $O$ , e  $u'$  em relação ao sistema de referência  $O'$ . Para descrever o evento físico, é preciso conhecer também o instante de tempo em que este acontece, adotando-se o tempo  $t$ , medido no referencial  $O$ , e  $t'$ , medido no referencial  $O'$ , temos:



$$r = x - x' , \quad (5)$$

$$r = V_x \cdot t , \quad (6)$$

$$V_x \cdot t = x - x' . \quad (7)$$

Como  $t' = t$ , segundo é proposto pela teoria da relatividade de Galileu, podemos dividir a equação (7) pelo intervalo de tempo  $t$ , segue que:

$$\frac{x'}{t} = \frac{x - V_x \cdot t}{t} , \quad (8)$$

assim, ver-se que a transformação de velocidades é dada por

$$u' = u - V_x , \quad (9)$$

onde  $u' = x'/t$  é a velocidade da partícula, medida no referencial  $O'$ ,  $u = x/t$  é a velocidade da partícula medida no referencial  $O$ , e  $V_x$  é a velocidade relativa entre os dois sistemas de referência.

A dinâmica é a parte da mecânica que estuda as causas que o produzem, ou modificam, o estado de movimento de uma partícula. Além da noção de massa, na dinâmica também vemos a noção de força. Pode-se entender a Força como qualquer esforço exercido em um objeto (FERRARO, 2007). Por exemplo, a força do vento, a força gravitacional, etc. Por ser uma grandeza vetorial, admite elementos como módulo, direção e sentido.

O princípio da inércia fala que um ponto material isolado, isto é, sem a ação de forças externas, estará sempre em equilíbrio. Aplicando-se uma força externa não nula num objeto isolado (em equilíbrio), ele irá variar sua velocidade devido a aceleração resultante não nula, que surge devido a força aplicada. A partir dessa observação, inicia-se o estudo do conceito dinâmico de força.

Analisando agora o caso da partícula sobre a ação de uma força constante que o movimentou longo do eixo  $x$ , a partir de ambos os referenciais inerciais  $O$  e  $O'$  em movimento relativo entre si, temos na Tabela 1 as informações a seguir:

Tabela 1: Análise do movimento da partícula em cada um dos referenciais  $O$  e  $O'$

Análise da partícula em ambos Referenciais	Ref. $O$	Ref. $O'$	Vel. relativa entre $O$ e $O'$
Início	$u_i$	$u'_i$	$V_x$
Fim	$u_f$	$u'_f$	$V_x$
Variação da velocidade	$\Delta u = u_f - u_i$	$\Delta u' = u'_f - u'_i$	$\Delta V_x = 0$

Logo, temos que a grandeza física aceleração, isto é, a variação de velocidade por unidade de tempo, em ambos os referenciais, é dada, por:



$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{\Delta u'}{\Delta t'} , \quad (10)$$

$$a = a' . \quad (11)$$

Na equação (10) leva-se em consideração que os intervalos de tempo em ambos os referenciais inerciais são iguais. Multiplicando a equação (11) pela massa da partícula temos:

$$m.a = m.a' \quad (12)$$

consequentemente,

$$F_r = F_r' , \quad (13)$$

onde  $F_r$  e  $F_r'$  é o módulo da força resultante que age sobre a partícula nos referenciais  $O$  e  $O'$  respectivamente.

Assim, nota-se que a relatividade de Galileu afirma que as leis da mecânica devem ser as mesmas para todos os referenciais inerciais em movimento uniforme entre si. Como afirma Thornton (2012).

## 2.2. A relatividade de Einstein e as consequências sobre o espaço e o tempo

A teoria desenvolvida por Einstein, de acordo com Yonezawa (2017), é baseada nos postulados a seguir: (i) As leis da física são idênticas em relação a qualquer referencial inercial. (ii) A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite no universo.

Tais postulados levam a uma nova interpretação do espaço e do tempo. Assim, acarretam em algumas consequências importantes no que diz respeito ao entendimento sobre o espaço e o tempo para observadores inerciais distintos, ou seja, observadores que se movimentam com velocidade constante entre si. Dentre essas consequências temos a Contração do Comprimento e a Dilatação do Tempo (FERRARO et. al., 2009).

Considere um objeto em repouso em relação a um sistema de referência  $R'$ , que se movimenta com velocidade constante  $u$  em linha reta, relativamente a um sistema de referencial inercial  $R$ . Como mostra a Figura 2.

Fonte: Ferraro (2009).

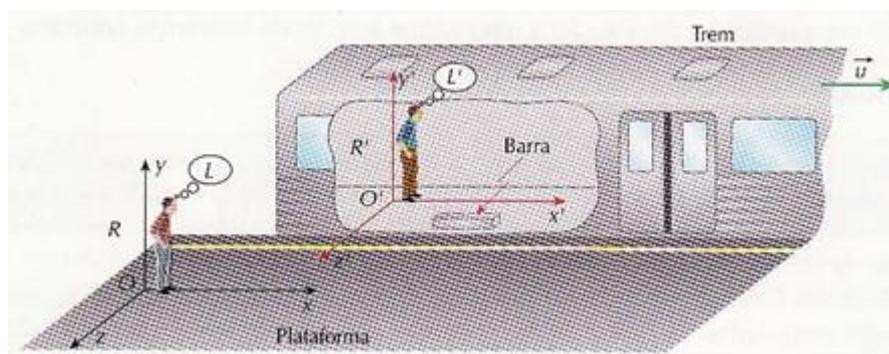


Figura 2: Análise do comprimento do objeto a partir de dois referenciais inerciais distintos  $R$  e  $R'$ . No referencial  $R$ , o observador (em  $O$ ) vê a barra em movimento junto ao trem, enquanto o referencial  $R'$ , que está em movimento junto com a barra,  $O'$  vê a mesma em repouso.

Para o observador  $O'$ , o objeto apresenta comprimento  $L'$  maior do que o comprimento  $L$  medido pelo observador  $O$ .

Pelas equações da relatividade einsteiniana, temos:

$$x'_2 = \gamma \cdot (x_2 - u \cdot t), \quad (14)$$

$$x'_1 = \gamma \cdot (x_1 - u \cdot t). \quad (15)$$

sendo  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$  o fator de Lorentz.

Tomando a subtração da equação (14) pela equação (15) temos:

$$x'_2 - x'_1 = \gamma \cdot [(x_2 - u \cdot t) - (x_1 - u \cdot t)] \Rightarrow x'_2 - x'_1 = \gamma \cdot (x_2 - x_1), \quad (16)$$

$$L = \frac{L'}{\gamma}. \quad (17)$$

Da equação (16) para a equação (17) definimos os comprimentos  $L = x_2 - x_1$  e  $L' = x'_2 - x'_1$ . Seja  $u$  a velocidade relativa entre os dois referenciais comparável com  $c$  (velocidade da luz), então  $\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$  será menor que 1. Assim, temos  $\gamma > 1$ , o que resulta em  $L < L'$ . Essa propriedade denomina-se contração do comprimento. Note que a contração do comprimento só ocorre na direção do movimento.

Em relação ao trem (referencial  $R'$ ), a plataforma (referencial  $R$ ) se movimenta com velocidade de módulo  $u$ , segundo é representado na Figura 3. O observador  $O'$  vê o objeto, em repouso em relação à plataforma, com comprimento menor do que aquele visto pelo observador  $O$ .

Fonte: Ferraro (2009).

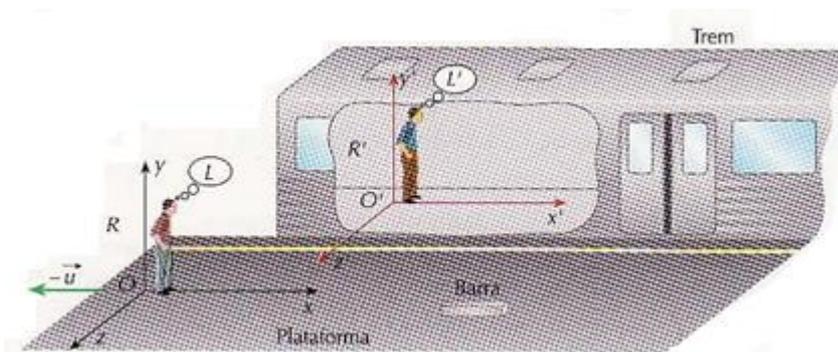


Figura 3: Análise do comprimento do objeto a partir de dois referenciais inerciais distintos  $R$  e  $R'$ . No referencial  $R$  o observador vê a barra em repouso, enquanto o referencial  $R'$  que está em movimento vê a barra estacionada na plataforma distanciando-se dele.

Para o observador  $O'$ , a barra apresenta comprimento menor do que para o observador  $O$  ( $L' < L$ ). O comprimento medido no referencial em relação ao qual um objeto está em movimento é menor do que o comprimento medido no referencial em relação ao qual o objeto está em repouso.

Por sua vez, os intervalos de tempo também são afetados pela relatividade de Einstein, contrariando a simultaneidade de eventos, proposta por Galileu.

Seja  $\Delta t'$  o intervalo de tempo de ocorrência de um fenômeno, medido por um relógio no referencial  $R'$ , que se move com velocidade constante  $u$  em relação a outro referencial  $R$ , que mede o mesmo fenômeno num intervalo de tempo  $\Delta t$ , a relação entre os intervalos de tempo medidos em ambos os referenciais é tal que:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}. \quad (18)$$

Pela equação (18),  $\Delta t$  é maior que  $\Delta t'$ , pois  $\gamma > 1$ . Assim, um relógio em movimento em relação a outro indica um intervalo de tempo  $\Delta t'$  menor e, conseqüentemente, se atrasa. Este efeito é denominado dilatação do tempo. Não são apenas os relógios em movimento que se atrasam, mas os processos físicos em geral, já que envolvem movimento. Contudo, esse atraso só é considerado quando as velocidades são comparáveis à velocidade da luz, o que ocorre no domínio das partículas elementares (FERRARO, 2009).

Pode-se demonstrar a equação (18) considerando um veículo (referencial  $R'$ ) que se movimenta com velocidade constante  $u$  em relação ao solo (referencial  $R$ ). Neste veículo existe uma fonte de luz  $F$  situada no piso, que emite um feixe de luz atingindo um espelho refletor situado no teto do veículo, como mostra a Figura 4(a). O feixe de luz é refletido voltando a fonte de luz. A distância  $d$  percorrida pelo feixe, durante um intervalo de tempo  $\Delta t'$ , no referencial  $R'$ , é  $d = c \cdot \Delta t'$ . Em relação ao referencial  $R$ , fixo no solo como mostra a Figura 4(b), a luz percorre a distância  $D$  com a mesma velocidade  $c$ , num intervalo de tempo  $\Delta t$ . Assim, temos  $D = c \cdot \Delta t$ .

Fonte: Ferraro (2009).

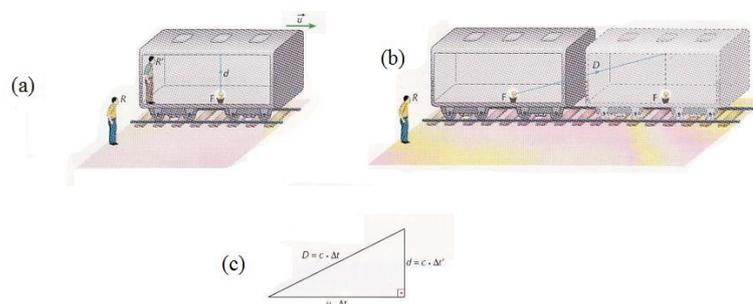


Figura 4: Em (a) observamos o caminho retilíneo da luz a partir do referencial  $R'$  em movimento junto ao trem. Em (b) observamos o caminho retilíneo da luz a partir do referencial  $R$  em repouso na plataforma fora do trem. Em (c) esquematizamos o caminho percorrido pela luz, em relação ao referencial  $R$ .

Aplicando-se teorema de Pitágoras no triângulo retângulo apresentado na Figura 4 (c), relacionamos o intervalo de tempo entre os dois referenciais  $R$  e  $R'$ :

$$c^2 \cdot (\Delta t)^2 = u^2 \cdot (\Delta t)^2 + c^2 \cdot (\Delta t')^2, \quad (19)$$

explicitando o intervalo de tempo  $\Delta t$  do referencial  $R$  com intervalo de tempo  $\Delta t'$ , do referencial  $R'$ , obtemos a seguinte equação:



$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \Delta t' . \quad (20)$$

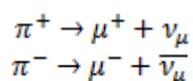
Novamente o fator de Lorentz  $\gamma$  aparece. Nota-se que, se  $u$  é comparável com  $c$ , temos que  $\gamma > 1$ , logo,  $\Delta t > \Delta t'$ . Este fenômeno, entre a relação dos intervalos de tempo para observadores inerciais distintos, é chamado de dilatação do tempo. Para o referencial em repouso dentro do trem, que observa a luz apenas subir e descer em linha reta, o intervalo de tempo medido por este ( $\Delta t'$ ) é chamado **intervalo de tempo próprio** (FERRARO, 2009; RIFFEL, 2019).

### 2.3. Múons na alta atmosfera terrestre

Múons são partículas elementares estáveis. Essas partículas são produzidas na atmosfera terrestre. Quando um raio cósmico de alta energia colide com núcleos de moléculas presentes na atmosfera terrestre, origina uma sequência de interações nucleares e eletromagnéticas, formando uma cascata de partículas cujas velocidades são próximas a da luz. Essa cascata é chamada de Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) e é descrita como um disco de partículas do qual o raio varia à medida que se propaga em direção ao solo. O número  $N$  de partículas secundárias depende da energia  $E_0$  do raio cósmico primário. No caso em que  $E_0 > 10^{12} \text{ eV}$  o número  $N$  é suficientemente grande para permitir a identificação exata do CAE.

Um CAE é composto por aproximadamente 90% de elétrons, pósitrons e fótons, 9% de múons e apenas 1% de partículas hadrônicas (prótons energéticos e píons carregados). O número de partículas de um CAE ao nível do mar pode alcançar dezenas de milhares de partículas e a componente muônica pode representar até 15% do total de partículas carregadas.

Dentro do primeiro grupo de partículas produzidas num CAE, estão os píons e os káons, sendo os píons em maior quantidade. Esses píons podem ser neutros ou podem possuir carga positiva ou negativa. Parte dos píons carregados decaem em múons na atmosfera (CONSALTER *et. al.*, 2010), a 15km de altitude, esse decaimento é descrito pelo diagrama a seguir:



Obedecendo a conservação da energia e da carga, ver-se que, um pión positivo  $\pi^+$  decai num múon positivo  $\mu^+$  mais um neutrino do múon  $\nu_\mu$ . Enquanto que, um pión negativo  $\pi^-$  decai num múon negativo  $\mu^-$  mais um antineutrino do múon  $\bar{\nu}_\mu$ .

Esses múons que chegam a superfície têm uma velocidade de aproximadamente  $0,9998c$  (CONSALTER *et. al.*, 2010), e possuem uma vida média de  $2,197 \mu\text{s}$  (OLIVE,



2014). É possível calcular o número de múons que chegam a superfície terrestre a partir da seguinte equação (FERRARO *et. al.*, 2009):

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_\mu}}, \quad (21)$$

onde  $N$  é o número final de partículas,  $N_0$  é o número inicial de partículas,  $\Delta t$  é o tempo de percurso e  $\tau_\mu$  é o tempo de vida média do múon.

### 3. Resultados

Experimentalmente, é observado que 63,4% dos múons formados na atmosfera chegam na superfície terrestre. Por outro lado, utilizando a equação (21) e a cinemática clássica, o número de múons observados na superfície seria nulo. Essa contradição se deve ao fato do múon possuir uma velocidade muito próxima a velocidade da luz. Logo, se faz necessário utilizar a relatividade de Einstein para corrigir essa taxa de decaimento.

Dessa maneira, tanto o espaço quanto o tempo, observados neste evento a partir de dois referenciais inerciais distintos, se modificam devidos aos efeitos relativísticos descritos anteriormente. Apesar dos dois efeitos acontecerem simultaneamente, podemos utilizar apenas um dos efeitos para determinar de fato o fenômeno de maneira correta. O efeito utilizado como objeto de trabalho foi a dilatação do tempo, que pode ser utilizado na correção do tempo de vida média do múon, como mostra a equação (22).

$$\tau_\mu = \gamma \cdot \tau'_\mu, \text{ onde } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}, \quad (22)$$

onde  $\tau_\mu$  é o tempo de vida média do múon no referencial do múon,  $\tau'_\mu$  é o tempo de vida média do múon no referencial em repouso na superfície terrestre e  $\gamma$  é o fator de Lorentz. Sendo a velocidade média dos múons, na alta atmosfera, dada por  $v = 0,9998c$ , onde  $c$  é a velocidade da luz, temos  $\frac{v^2}{c^2} = 0,9996$ , resultando no fator  $\gamma = 50$ . Portanto, o tempo de vida média do múon, corrigido de acordo com a relatividade de Einstein, é tal que  $\tau_\mu = 50 \cdot \tau'_\mu$ . Por outro lado, o cálculo do tempo de percurso é executado da seguinte maneira:

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{v} = \frac{15000}{0,9998c} = 50\mu s, \quad (23)$$

onde  $\Delta S$  é o espaço percorrido e  $v$  é a velocidade do múon e  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s é a velocidade da luz.

Sendo assim, substituindo a equação (22) e o fator de correção do tempo de vida média do múon na equação (21), chegamos a equação (24):

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{50}{50 \cdot 2,197}} = 0,634 \cdot N_0, \quad (24)$$



onde vemos que o número de múons  $N$ , detectados na superfície terrestre, corresponde a uma fração considerável do número de múons  $N_0$  que são formados na alta atmosfera terrestre, como previsto experimentalmente.

#### 4. Conclusões

Foi observado que, de acordo com a mecânica clássica, não é possível descrever o processo de decaimento do múon, pois nessa teoria não foi levado em consideração os efeitos relativísticos, o que mostrava a discordância entre os dados experimentais e os dados teóricos.

As correções relativísticas de Einstein na teoria devem ser levadas em consideração devido as altas velocidades dos múons, comparáveis à velocidade da luz. Assim vemos que esse fenômeno do CAE serve também como uma comprovação experimental da Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Einstein em 1905.

Vale observar, também, que os efeitos relativísticos de contração do espaço e dilatação do tempo, para referenciais inerciais distintos, não ocorrem separadamente, e sim, simultaneamente. Deste fato, se considerarmos apenas o efeito de contração do espaço, para desenvolvimento dos cálculos, também conseguiríamos determinar, com precisão teórica, o número de múons que são observados na superfície terrestre.

Como foi previsto experimentalmente, observa-se pela equação (24) que, de fato, considerando os efeitos relativísticos, em média 63,4% número total de múons, formados na alta atmosfera terrestre, são detectados. Dessa maneira, tal processo se mostra como uma confirmação experimental para a teoria da relatividade restrita, que foi proposta por Einstein em 1905.

#### 5. Referências

- CARVALHO, R. *et al.* **Revisão integrativa: o que é e como fazer.** Einstein, v. 8, n 1, (2010).
- CONSALTER, D. M. *et al.* **Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 585-591, (2007).
- CONSALTER, D. M. *et al.* **Medida da vida média do múon.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 4, p. 4502, (2010).
- FERRARO, N. G.; RAMALHO, J. F.; SOARES, P. A. T. **Fundamentos da Física vol. 1.** São Paulo: Moderna, 2007.
- FERRARO, N. G.; RAMALHO, J. F.; SOARES, P. A. T. **Fundamentos da Física vol. 3.** Rio de Janeiro: Moderna, 2009.
- LEÃO, S. A. NOTAS DE AULA: Mecânica Clássica. Goiânia, Goiás. Universidade Federal de Goiás: Instituto de Física. Disponível em



<<https://souexatas.blogspot.com/2016/11/notas-de-aulas-mecanica-classica.html>>

Acessado em 13 de fevereiro de 2019.

MARION, J. B.; THORNTON, S. T. Dinâmica clássica de partículas e sistemas. Edição 5. Revisão técnica: Fábio Raia. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

OLIVE, K. A. et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C38, 090001 (2014). Disponível em: <http://pdg.lbl.gov> . Acesso em: 28/11/2019.

RIFFEL, R. A. **Uma introdução a TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL.** Santa Maria. 2010. Material didático elaborado para a disciplina de Relatividade Especial do curso de Física Licenciatura a Distância – UFSM/UAB. Disponível em <<http://w3.ufsm.br/rogemar/docs/relatividade.pdf>> Acessado em 12 de fevereiro de 2019.

YONEZAWA, A. **Física de Partículas para Ensino Médio.** Universidade Federal de Pelotas: Instituto de Física e Matemática, 2017.