

ENSINO SOBRE O DECAIMENTO DO MÚON PARA O TRATAMENTO DA DILATAÇÃO DOS TEMPOS E CONTRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS

Jizreel Pereira da Silva

*Mestre em Ensino de Física pelo Departamento de Física da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), Rio de Janeiro, Brasil
(jizreelsilva@yahoo.com.br)*

Resumo: O trabalho desenvolve um projeto em sala de aula para 23 alunos do 3º ano do Ensino Médio, exemplificando o decaimento dos múons para complementar o estudo da dilatação dos tempos e contração das distâncias. Desenvolvemos uma discussão sobre esses aspectos da relatividade restrita, nos limitando aos efeitos relativísticos dos múons. O processo de ensino-aprendizagem foi dado de forma teórica e com uma amostragem de questões sobre o tema proposto e simulador virtual.

Palavras-chave: Múons; Dilatação; Contração; Decaimento; Relatividade.

INTRODUÇÃO

Existem diversas discussões no âmbito de escolas e corpo docente para abordagem de temas que envolvam a Física Moderna e Contemporânea (FMC), nos níveis elementares, principalmente no Ensino Médio. Ainda de forma tímida, temos introdução de livros e trabalhos de professores e pesquisadores em Ensino de Física que contribuem nesse sentido.

Uma das linhas de técnicas de aprendizagem que o autor se insere é dada por Jerome Bruner (1915-2016), em que considera a possibilidade de ensinar qualquer assunto para qualquer idade, desde que utilize ferramentas adequadas para o processo didático.

O tema abordado neste trabalho envolve a dilatação dos tempos e contração das distâncias, mas possuindo um olhar particular na descrição dos múons para complementar o estudo em questão. De acordo com Rodrigues (2001), a inserção da

teoria da relatividade restrita se funda basicamente em três aspectos: “a mudança de padrão de raciocínio e interpretação da realidade aliada à abstração e sofisticação do pensamento, graças à concepção de tempo como uma quarta dimensão; a possibilidade dessa teoria servir de porta de entrada para outros tópicos da FMC e, finalmente, pela necessidade de abordagem de um tema tão presente na sociedade através da divulgação científica”.

Discutimos os aspectos introdutórios da teoria, em que Einstein formula a teoria da relatividade restrita no início do século XX em 1905, unificando o espaço e o tempo, chamando de espaço-tempo em 4 dimensões. Descreve o movimento das partículas com velocidades próximas a da luz, desconsiderando os efeitos gravitacionais (Reiffel, 2019 citado por Fontenelle; Sousa, 2020).

A teoria da relatividade restrita, também conhecida como teoria da relatividade especial, compara os movimentos observados em diferentes referenciais, com velocidade constante uns em relação aos outros e ao falarmos de velocidade, no caso da teoria da relatividade restrita, os efeitos são relativísticos, o que impõe uma discussão do tratamento para velocidades próximas da luz.

James Clerk Maxwell, por volta de 1860, resume em um sistema de quatro equações as leis empíricas da eletricidade e do magnetismo. Uma das consequências dessas equações é o valor determinado da velocidade para as ondas eletromagnéticas, com $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$, aproximadamente $3,0 \cdot 10^8$ m/s.

O que se pode afirmar é que as equações de Maxwell estão corretas e a velocidade das ondas eletromagnéticas é a mesma em todos os referenciais inerciais, independente do movimento da fonte do observador, por isso, através desses trabalhos e outros experimentos tratando da invariância da luz, culminaram para a teoria da relatividade especial de Einstein (Tipler; Ralph, 2017).

Será abordado neste trabalho somente a discussão da dilatação dos tempos e contração das distâncias com sua aplicabilidade no decaimento dos múons, bem como uma análise da simulação e questões aplicadas aos estudantes.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A velocidade da luz é aproximadamente $3,0 \cdot 10^8$ m/s e que os corpos em geral atingem velocidades bem menores do que a da luz. No caso de partículas como os elétrons, conseguem atingir velocidade cerca de $v = 0,99c$, ou seja, bem próximas da luz. Diversos experimentos tentam obter velocidades maiores do que a da luz, mas até o presente momento não obtiveram resultado, pois um dos postulados de Einstein diz que um corpo com massa não pode atingir velocidade igual ou superior à da luz. Discutimos que dois eventos são simultâneos, observados a partir de um determinado referencial inercial, mas em outro referencial podem não ser simultâneos (Kaneko, 2017).

Para a nossa discussão sobre a dilatação dos tempos, consideramos o exemplo adotado por Assad (2015), que considera a medição de Maria estando dentro de um trem e João na plataforma. Maria está num trem que se move com velocidade uniforme v e para medir o intervalo entre dois eventos, possui um relógio eletrônico. As condições para esse experimento de Maria é que o **evento 1** é a emissão de um clarão pela lâmpada B e o **evento 2**, a chegada da luz, de volta à fonte, depois da reflexão no espelho fixo no teto do vagão do trem.

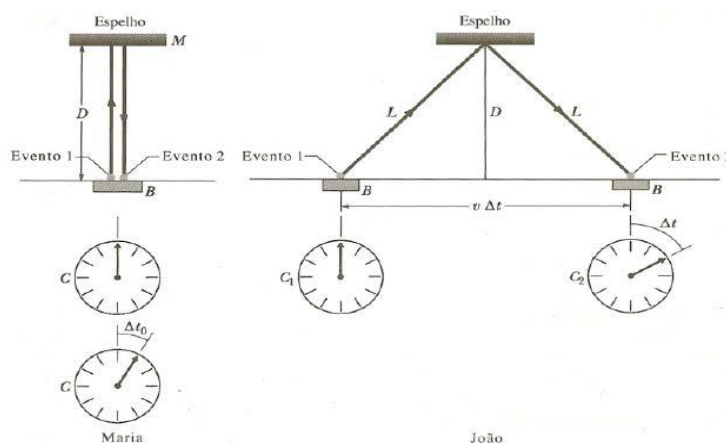


Figura 1. Ilustração das medidas de Maria no trem e João na plataforma, com os eventos 1 e 2 sobre a luz (Halliday; Resnick; Krane, 2004 citado por Assad, 2015).

Maria observou que o intervalo entre os dois eventos é da forma

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c} \text{ (Maria)} \quad (1)$$

Sendo D a distância entre a fonte e o espelho. Maria observou que estes dois eventos ocorrem no mesmo local, medindo com um único relógio C , localizado naquele local, sendo Δt_0 denominado tempo próprio.

Já para João que se encontra na plataforma da estação, o intervalo de tempo medido entre os dois eventos é

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \text{ (João)} \quad (2)$$

Sendo Δt o tempo não próprio. Enquanto o trem passa por ele e como a luz possui a mesma velocidade tanto pra João como para Maria, então no caso de João a luz percorre uma distância maior, com valor de $2L$. Desenvolvendo a relação da medição de Maria e João, temos

$$L^2 = \left(\frac{1}{2}v \cdot \Delta t\right)^2 + D^2 \text{ e, por Maria, } D = \frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0$$

$$L^2 = \left(\frac{1}{2}v \cdot \Delta t\right)^2 + \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0\right)^2 \text{ e, por João, } L = \frac{1}{2}c \cdot \Delta t$$

$$\left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t\right)^2 = \left(\frac{1}{2}v \cdot \Delta t\right)^2 + \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\Delta t\right)^2 \cdot (c^2 - v^2) = \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0\right)^2$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot (\Delta t)^2 \cdot c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot c^2 (\Delta t_0)^2 = (\Delta t)^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = (\Delta t_0)^2$$

Onde obtém-se a dilatação do tempo na forma

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

Essa expressão é denominada dilatação temporal ou dilatação dos tempos. Os eventos ocorreram em referenciais diferentes e para medir Δt é necessário sincronizar os relógios C_1 e C_2 , um em cada local. Por isso o tempo de João é não próprio e o tempo de Maria é o tempo próprio.

Para fins de redução da equação, utiliza-se o fator de Lorentz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, com $\gamma > 1$, onde a equação (3), fica na forma $\Delta t = \gamma \Delta t_0$. Podemos utilizar também $\beta^2 = \frac{v^2}{c^2}$, como parâmetro de velocidade, com $\beta > 1$.

No caso da contração das distâncias, considerando os mesmos observadores João e Maria, nas mesmas condições da discussão anterior, analisamos como eles irão medir o comprimento da plataforma. João faz sua medida e considera o como sendo L_0 , sendo o comprimento próprio, pois a plataforma está em repouso com relação à sua posição. Marcando o trem para a partir desse ponto no trem marcado, João possa observar sua passagem e o trem com velocidade v , observa a equação na forma

$$L_0 = v \Delta t \text{ (João)} \quad (4)$$

Para Maria a plataforma está em movimento e no movimento que o trem faz, com a mesma velocidade v , percebe que os dois eventos observados por João ocorrem no mesmo local do seu referencial, de modo que o intervalo Δt_0 que ela mede é um intervalo de tempo próprio. O comprimento da plataforma para Maria é da forma

$$L = v \Delta t_0 \text{ (Maria)} \quad (5)$$

Ao dividirmos a equação de Maria pela de João, teremos

$$\frac{L}{L_0} = \frac{v \Delta t_0}{v \Delta t} \Rightarrow \frac{\Delta t_0}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ ou } L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (6)$$

Sendo L a contração do comprimento “distâncias”. Na realidade essa contração é consequência direta da dilatação temporal e essa contração se dá, única e exclusivamente na direção do movimento (Assad, 2015).

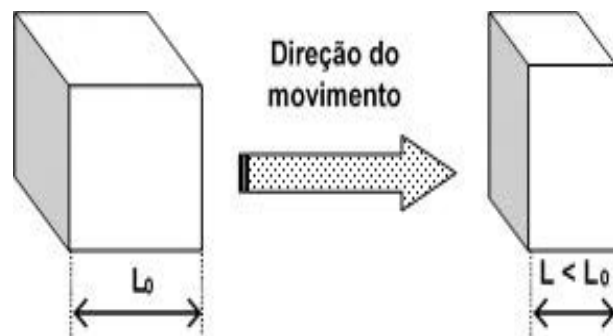


Figura 2. Contração das distâncias na direção do movimento (Assad, 2015).

Com relação à duração de um evento e as dimensões de um corpo, a teoria da relatividade especial afirma que: “a duração (intervalo de tempo) de um evento não é um conceito absoluto, mas depende do referencial usado para a observação e que as dimensões de um corpo, da mesma forma, não são grandezas absolutas, dependendo também do referencial usado para a sua observação”.

O decaimento do múon é uma das evidências da dilatação dos tempos e contração das distâncias. Mas como se dá o processo para a formação do múon?

O múon pode ser encontrado na atmosfera a partir de raios cósmicos e é a partícula com carga elétrica mais abundante na superfície da Terra. Os múons atravessam facilmente a matéria e a energia média na superfície terrestre é de 4 GeV, com velocidades próximas da luz (Fauth et al., 2010).

O processo inicialmente se dá pela colisão de um raio cósmico de alta energia que é de uma partícula primária e que essa partícula primária ainda em desenvolvimento pela ciência, com os núcleos de moléculas na atmosfera terrestre, dando sequência nas interações, chegando a partículas secundárias, em que na realidade todo esse processo é do tipo cascata, conhecida como Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE). Os múons através da interação fraca, decaem nos seguintes esquemas



Onde μ^+ é o múon positivo e μ^- o múon negativo, e^+ sendo o pósitron, e^- o elétron, ν_e o neutrino do elétron, ν_μ o neutrino do múon, bem como seus antineutrinos que aparecem com a barra em cima. Os múons podem representar 15% do total de partículas carregadas de um CAE ao nível do mar (Fauth et al., 2007).

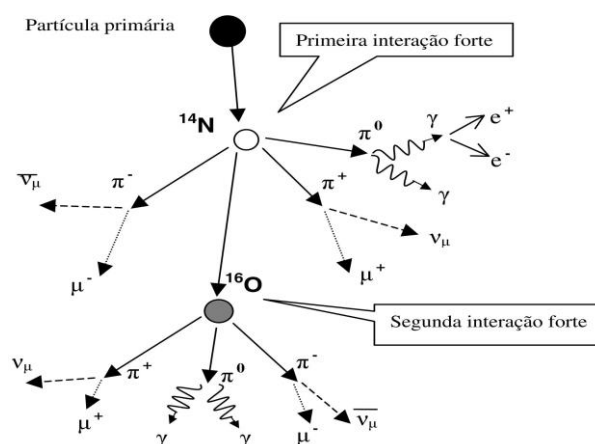


Figura 3. Representação esquemática de um chuveiro atmosférico extenso (CAE) (Fauth et al., 2007).

O múon é representado pela letra μ , com alto fluxo, trajetória retilínea, alta energia e longa vida média, sendo ideal para exemplificar os efeitos relativísticos. Para tratarmos dessa abordagem do decaimento do múon nos efeitos relativísticos, utilizamos a equação do decaimento para a determinação do número de múons (N) num determinado período através da equação

$$N = N_0 \cdot e^{-t/\Delta t_0} \quad (9)$$

Sendo N_0 o número de múons no tempo $t = 0$, intervalo necessário para alcançar a superfície da Terra e Δt_0 o tempo de vida média (sendo o intervalo de tempo próprio). A vida média dos múons $\Delta t_0 = 2,2\mu s$, com velocidade média de $v = 2,994 \cdot 10^8$ m/s, ou seja, $v = 0,998c$.

Para utilizarmos a equação (7), temos que $t = \gamma \cdot \Delta t_0$ e o fator de Lorentz pode ser determinado por sua energia de repouso $E = mc^2 = 105,658 MeV$. A energia detectada em laboratório é $E' = 5 GeV$ e fica na forma

$$\gamma = E'/mc^2 \quad (10)$$

Com fator de Lorentz de aproximadamente 47,32. Como $t = 22,97\Delta t_0$ o tempo do percurso do múon, então para estimar o número de múons que chega na superfície da Terra em relação aos que são criados na alta atmosfera, temos

$$\frac{N}{N_0} = e^{-22,97\Delta t_0/47,32\Delta t_0} = 0,62$$

O que mostra através da dilatação dos tempos que aproximadamente 62% dos múons conseguem chegar à superfície da Terra (Fauth et al., 2007).

Se considerarmos a abordagem da mecânica clássica, teríamos desde a criação dos múons até a sua desintegração, uma distância de aproximadamente 650 metros em sua trajetória. Como experimentos apontam que os múons são criados a aproximadamente 10 km de altitude são detectados na superfície da Terra, tendo em vista a dilatação temporal.

Para um referencial fixo no múon, o tempo de desintegração é $\Delta t_0 = 2,2 \cdot 10^{-6} s$ e utilizando a equação (3), fica na forma

$$\Delta t = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{0,998^2 c^2}{c^2}}}$$

O que dá aproximadamente $35\mu s$. Um observador na Terra, observa a distância percorrida pelo múon em torno de 10 km, o que explica a possibilidade de detectar os múons na superfície da Terra. No caso da discussão da contração das distâncias, com relação ao múon e a Terra, temos

$$L_{múon} = L_{Terra}/\gamma$$

$$L_{múon} = 10km \cdot 0,0632$$

$$L_{múon} = 632 m$$

O que mostra a possibilidade de detecção (Assad, 2015). Outro exemplo é se durante um certo intervalo de tempo, sejam detectados 10^8 múons a uma altitude de 9 km, a quantidade de múons detectados no nível do mar na previsão não relativística, seria, considerando o tempo a razão da distância pela velocidade, dando $9000/0,998c$, aproximadamente $30\mu s$, sendo 15 tempos de vida, o que daria $N_0 = 10^8$ e $t = 15\Delta t_0$. Utilizando a equação (7), teremos

$$N = N_0 \cdot e^{-t/\Delta t_0} = 10^8 e^{-15} = 30,6$$

Com aproximadamente 31 dos 100 milhões de múons originais, conseguiriam ser detectados ao nível do mar. Agora, se observarmos do ponto de vista relativístico, a Terra deve percorrer apenas a distância contraída de 600m no referencial do múon e o tempo necessário para esse evento é $2\mu = 1\Delta t_0$. Então o número detectado de múons ao nível do mar é

$$N = 10^8 e^{-1} = 3,68 \cdot 10^7$$

Ou seja, na visão relativística, iremos detectar 36,8 milhões de múons no mesmo intervalo de tempo (Tipler; Ralph, 2017).

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado com 23 alunos do 3º ano do Ensino Médio, numa escola do Programa Rio Criança Cidadã em São Cristóvão-RJ. As atividades foram realizadas totalizando 5 aulas para o tema proposto. Os nomes dos estudantes são colocados na forma de A, ..., W.

A primeira aula tratamos da dilatação dos tempos, a segunda aula, contração das distâncias, todas ao final desenvolvendo exercícios de fixação, com o uso de projeção de slides e quadro branco para o desenvolvimento dos exercícios. A terceira aula, abordamos sobre uma das formas de exemplificar os assuntos tratados dos efeitos relativísticos, sendo no caso, o decaimento do múon, conforme o tratamento abordado neste trabalho. A quarta aula, recapitulamos as três aulas para maturação dos estudantes, aplicando três questões para fixar o conhecimento (ver apêndice A) e na quinta aula, finalizamos com uma simulação, onde utilizamos um notebook projetando em sala de

aula, cada aluno desenvolvendo sua simulação e anotando os resultados obtidos sobre o decaimento do múon.

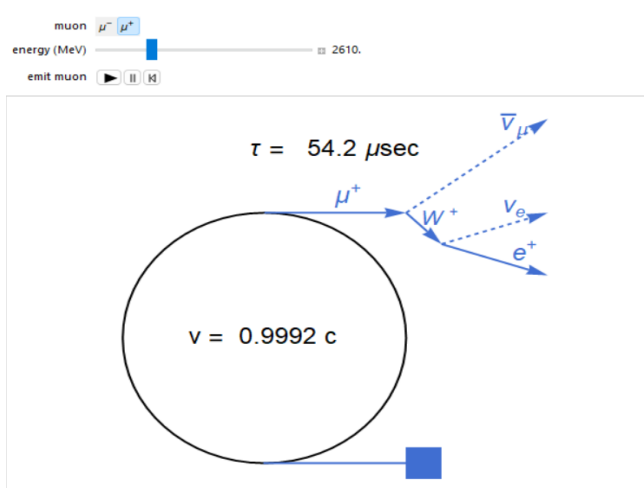


Figura 4. Exemplo de simulação de um aluno sobre o decaimento do múon na dilatação relativística do tempo (BLINDER, 2011).

O simulador foi Blinder (2011), na plataforma A realização experimental é simples e individual, com objetivo de emitir um múon, podendo escolher se múon positivo ou negativo, e o quanto de energia será emitido em *MeV*. Ao término da simulação, irá anotar numa planilha, conforme tabela abaixo, o tipo de partícula (se múon positivo ou negativo), energia emitida em *MeV*, e o decaimento (as partículas do processo de desintegração).

Tabela 1. Planilha utilizada pelo estudante Q para exposição gráfica e discussão dos resultados. Fonte: O Autor.

Aluno Q		
Tipo de múon	Energia (MeV)	Partículas da desintegração
μ^+	6230	$\bar{\nu}_\mu + W^+$

A simulação experimental com os estudantes foi de desenvolver o entendimento do funcionamento dos efeitos relativísticos e para complementar esse processo de aprendizagem, simulando o decaimento do múon e através da experimentação virtual, analisar o que podemos extrair de informação por parte dos dados dos estudantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação ao experimento virtual, dos 23 alunos que realizaram experimentalmente o decaimento do múon, 13 alunos escolheram o múon positivo em sua atividade. No caso da energia em *MeV*, o gráfico abaixo mostra a tendência de escolha dos alunos.

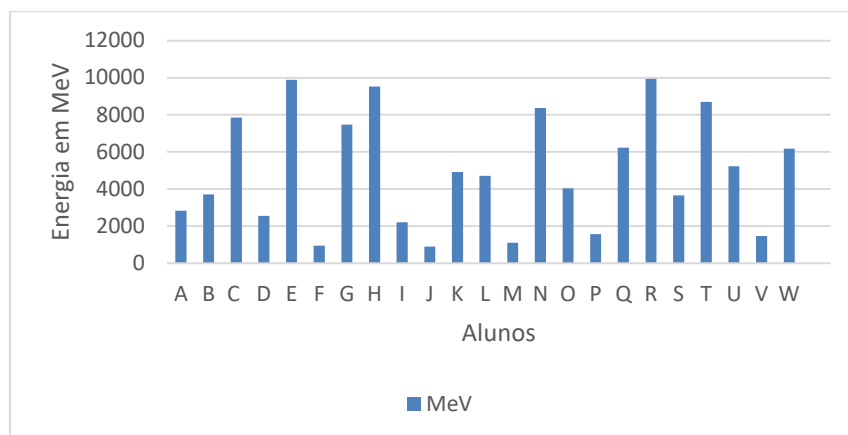


Gráfico 1. Amostra das energias escolhidas pelos alunos no experimento virtual sobre o decaimento do múon.

O gráfico mostra de forma equilibrada, as escolhas dos estudantes quanto à energia *MeV* para emissão dos múons e a faixa de energia entre 2.000 *MeV* e 4.000 *MeV*, ficou entre a escolha por maior parte dos alunos.

Os alunos perceberam que na emissão de múon positivo, o decaimento ocorre na desintegração composta de um antineutrino do múon, neutrino do elétron e um pósitron e na emissão de um múon negativo, o decaimento ocorre na desintegração composta de um neutrino do múon, antineutrino do elétron e um elétron.

Para o caso das três questões aplicadas aos 23 estudantes, conforme apêndice A, para a primeira questão faz a relação da velocidade dos múons com a velocidade da luz, com seu tempo de vida em referencial em repouso e pede para determinar a distância que o múon pode percorrer antes de se desintegrar, de acordo com a relatividade restrita.



Gráfico 2. Amostra das opções das distâncias escolhidas pelos alunos na primeira questão.

A opção correta é a letra (C) e de acordo com o gráfico (2), a região 135, a única entre 100 e 150 do eixo vertical que é a distância para o múon se desintegrar da ordem de 10^2 , percebemos que 14 alunos marcaram a opção correta.

A segunda questão apresenta o tempo de vida média dos múons em repouso e também considera um valor para o tempo de vida num acelerador de partículas e pede para determinar a velocidade destes múons no referencial de laboratório.

A questão apresenta valores muito próximos para as opções e o estudante mais detalhista, conseguirá encontrar o valor adequado para o enunciado e 11 alunos conseguiram marcar a opção (A) que é a opção correta.

Para a terceira e última questão, anuncia o tempo próprio de vida dos múons e considera a emissão de feixes de múons penetrando a atmosfera da Terra com velocidade próxima da luz e pede para determinar o tempo de vida do múon para um observador na Terra e 19 alunos conseguiram marcar a opção (D) como sendo a adequada.

Percebe-se que as três questões tratam da distância, tempo e velocidade dos múons, o que justamente foram colocadas para explorar o tema proposto do trabalho. Tivemos um momento de comentários sobre as questões, pois a ideia não era de avaliar para pontuar, mas para extrair uma noção de que o entendimento no assunto é importante, mas ainda percebemos o temor quando se envolve cálculos, mesmo que aparentemente razoáveis.

Os estudantes entenderam que não é ideal estudar fenômenos que envolvam velocidades próximas da luz, com o tratamento da mecânica clássica, pois de fato, difere da realidade. É como utilizar uma ferramenta não adequada para determinado trabalho.

Tipo, utilizar uma tesoura para cortar um tronco de uma árvore, ao invés de um machado ou uma serra elétrica.

Os estudantes entenderam que existem vários exemplos para tratar um determinado tipo de estudo, como no caso da dilatação dos tempos e contração das distâncias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho mostrou a possibilidade de aplicar temas da Física Moderna e Contemporânea, ainda sensível aos olhos da escola e dos professores, pois quando falamos Física Moderna e Contemporânea, envolvem inúmeros assuntos que tornam desafiadores tanto para o professor ter o domínio do assunto, tanto para transmitir esse assunto.

A humanidade caminha nesse sentido, pois temos inovações tecnológicas, aparelhos cada vez mais com altas tecnologias e tudo isso, gerado pela Física Moderna que tanto apavora o ambiente educacional e com esse temor, ficamos reféns, nos prendendo à Física Clássica.

O trabalho se dedicou a exemplificar com os estudantes sobre os múons para complementar o estudo de parte da relatividade restrita e quando o professor mostra sua motivação fazendo contagiar os educandos, de fato o processo de ensino-aprendizagem encontra ambiente para a discussão dos assuntos e participação do alunado.

A relatividade restrita ou especial é uma das portas de entrada para o mundo da Física Moderna e Contemporânea, onde o professor poderá utilizar diversas metodologias ativas, como simulações, jogos, pesquisa, dentre outros métodos para alcançar uma aprendizagem significativa por parte dos estudantes.

REFERÊNCIAS

- ASSAD, G. E. *Física Moderna para o Ensino Médio*. João Pessoa, IFPB, 2015.
- BLINDER, S. M. *Relativistic Time Dilation in Muon Decay*. Wolfram Demonstrations Project, 2011. Disponível em: <https://demonstrations.wolfram.com/RelativisticTimeDilationInMuonDecay/#more>. Acesso em: 14 jan., 2023.
- FAUTH, A. C.; PENEREIRO, J. C.; KEMP, E.; GRIZOLLI, W. C.; CONSALTER, D.; GONZALEZ, L. F. G. 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.
- FAUTH, A. C.; GROVER, A. C.; CONSALTER, D. M. Medida da vida média do múon. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 4, 4502, p. 1-7, 2010.
- FONTENELLE, P. J. G.; SOUSA, M. S. M. Correções da relatividade restrita no problema do decaimento do múon: uma revisão conceitual. *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 6, p. 1-13, 2020.
- KANECO, U. F. *Física Moderna e Contemporânea*. Londrina, Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.
- RODRIGUES, C. D. O. *Inserção da teoria da relatividade no ensino médio: uma nova proposta*. Florianópolis – SC. 163 f. [Dissertação (Mestrado em Educação)]. Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. 2001.

APÊNDICE A

Nome do aluno: _____

QUESTÕES SOBRE O DECAIMENTO DO MÚON E DILATAÇÃO DOS TEMPOS E CONTRAÇÃO DAS DISTÂNCIAS

Questão 1 Os múons cósmicos são partículas de altas energias, criadas na atmosfera terrestre. A velocidade de alguns desses múons é tal que $v^2 = 0,998.c^2$ e o seu tempo de vida em referencial em repouso é aproximadamente $t_0 = 2.10^{-6}$ s. Pelas leis da mecânica clássica, com esse tempo de vida tão curto, nenhum múon poderia chegar ao solo, no entanto eles são detectados na Terra. Pelos postulados da relatividade restrita, o tempo de vida do múon em um referencial terrestre (t) e o tempo (t_0) são relacionados pelo fator relativístico

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Para um observador terrestre, a distância do múon pode percorrer antes de se desintegrar é, aproximadamente, de:

(A) $6,0.10^2$ m (B) $6,0.10^3$ m (C) $13,5.10^3$ m (D) $17,5.10^3$ m (E) $27,0.10^3$ m.

Questão 2 O tempo de vida média dos múons em repouso é de $2,2 \mu\text{s}$. As medidas dos múons produzidos em um acelerador de partículas mostram que eles têm um tempo de vida de $6,9 \mu\text{s}$. A velocidade destes múons em m/s no referencial de laboratório é:

(A) $2,8415.10^8$ (B) $2,8133.10^8$ (C) $2,7617.10^8$ (D) $2,8715.10^8$ (E) $2,6211.10^8$

Questão 3 O tempo próprio de vida dos múons é da ordem de $2,2 \mu\text{s}$. Se um feixe de múons penetra a atmosfera com velocidade de $0,99c$, o tempo de vida para um observador na Terra é de aproximadamente:

(A) $12,3 \mu\text{s}$ (B) $13,5 \mu\text{s}$ (C) $14,1 \mu\text{s}$ (D) $15,6 \mu\text{s}$ (E) $16,2 \mu\text{s}$