

Os postulados da relatividade: variações temporal, espacial e massiva

The postulates of relativity: temporal, spatial and massive variations

Pedro Henrique da Silva Lopes¹, José Maria dos Santos Lobato Júnior³; Andrey Brito Nascimento², Francisco Diego Feitosa de Souza³, Raimundo Nonato Vieira de Oliveira³, Rodrigo Ronald Carvalho Chaves⁴, Francisco de Paula Afonso Costa⁵, José Francisco da Silva Costa^{1*}

RESUMO

Esse artigo vem abordar um estudo sobre as teorias da relatividade restrita com base nos dois postulados que evidenciaram como consequências a contração do comprimento, a dilatação da massa e a contração do tempo. O importante dessa teoria mostra uma particularidade para o campo da Mecânica Clássica, restringindo-se a corpos a baixa velocidade, onde não foi possível perceber as variações temporais e espaciais considerando o tempo como uma grandeza invariável. Nesse sentido, percebe-se a grande relevância no estudo da Física Moderna. Para uma melhor abordagem, discutem-se nesse artigo os formalismos matemáticos dessas teorias, mostrando no caso dos postulados da relatividade a possibilidade de estudar o espaço-tempo e suas dilatações e contrações, baseando-se na afirmativa das invariantes leis físicas e o caso limite da luz no vácuo, limitando-se a uma constante universal onde nenhum outro corpo material pode atingir valor de c , que representa a velocidade da luz no vácuo. Nesse sentido, conclui-se essa pesquisa, de caráter explicativa, mostrando como validade e confirmação dessa abordagem alguns exemplos como aplicações e dando ainda uma ênfase especial ao caso do decaimento de partículas múons, cuja detecção e aparecimento na superfície terrestre, apenas é possível com o advento da teoria relativística, pois tais partículas de acordo com a Mecânica Clássica não poderiam existir com base na vida média prevista pelo decaimento.

Palavras-chave: Relatividade Restrita; Postulados da relatividade; Contração do comprimento e tempo; Dilatação da massa.

ABSTRACT

This article approaches a study on the theories of special relativity based on the two postulates that showed the contraction of length, mass expansion and time contraction as consequences. The importance of this theory shows a particularity for the field of Classical Mechanics, being restricted to bodies at low speed, where it was not possible to perceive temporal and spatial variations considering time as an invariable quantity. In this sense, the great relevance in the study of Modern Physics is perceived. For a better approach, this article discusses the mathematical formalisms of these theories, showing in the case of the postulates of relativity the possibility of studying space-time and its expansions and contractions, based on

¹ Universidade Federal do Pará, Abaetetuba, Pará – Brasil.

*E-mail: jfsc@ufpa.br

² Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Açailândia, Maranhão – Brasil.

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Tucuruí, Pará – Brasil.

⁴ Universidade do Estado do Pará (UEPA) Campus XIV, Moju, Pará – Brasil.

⁵ Prefeitura Municipal de Igarapé Miri, Pará – Brasil.

the assertion of invariant physical laws and the limiting case of light in a vacuum, limiting itself to a universal constant where no other material body can reach the value of c , which represents the speed of light in a vacuum. In this sense, this explanatory research is concluded, showing as validity and confirmation of this approach some examples as applications and also giving a special emphasis to the case of the decay of muon particles, whose detection and appearance on the Earth's surface is only possible with the advent of relativistic theory, as such particles according to Classical Mechanics could not exist based on the half-life predicted by decay.

Keywords: Special Relativity; Postulates of relativity; Length and time contraction; Mass expansion.

INTRODUÇÃO

A teoria da Relatividade Especial foi proposta pelo físico Albert Einstein em 1905 (PAIS, 1995), cuja teoria revolucionou e ampliou o conhecimento científico pertinente à Física. A questão de um tempo absoluto proposto pela teoria da Mecânica Newtoniana, devido a baixa velocidade das partículas, impediu a detecção de uma dilatação temporal. Com o advento da teoria da relatividade, essa detecção se tornou possível considerando altas velocidades de partículas que levou às formulações matemáticas muito mais gerais (EISBERG, 1979).

No entanto, a teoria deveria ser testada para que fosse possível consolidar e confirmar o estudo desenvolvido na área da Física relativística. As experiências de Michelson e Morley levaram a considerar que a velocidade da luz era a mesma para referenciais inerciais ou em repouso ou em movimento retilíneo, além de considerar importantes conclusões a respeito da substância imaginária que ocupava o espaço vazio denominada de éter que há muito tempo foi suposto como um referencial absoluto e não foi identificado com a experiência no Interferômetro de Michelson (P. HARIHARAN, 1991).

Dessa maneira, a Mecânica Relativista foi ocupando um espaço crucial no domínio da Física, baseando-se em dois importantes postulados relacionados com a velocidade da luz (YOUNG; FREEDMAN, 2009), (HALLIDAY, RESNICK e KRANE, 1996) e sobre as leis da Física válida para um sistema de referência inercial (TIPLER, 1981). Na teoria da relatividade os fenômenos são analisados em relação a sistemas de referência inerciais, ou seja, a sistemas de referência onde é válido o princípio da inércia ou para o sistema de referência em que o movimento é retilíneo e uniforme considerado inercial.

As duas áreas de conhecimentos, a saber a Mecânica Clássica e a Mecânica Relativística, a diferença consiste nas velocidades das partículas. Na primeira, supõe-se velocidades baixíssimas em comparação com a velocidade da luz de valor aproximado de $300.000.000 \text{ m/s}$ (BREWSTER, 2010).

No caso da Mecânica Clássica de Newton (GLEICK, 2004), a dilatação temporal, contração espacial e dilatação de massa não se verificam essas variações devido as baixas velocidades dos corpos (NUSSENZVEIG, 2002). Ou seja, o fator de Lorentz para velocidade $v \ll c$, conduz ao valor unitário, isto é,

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

Nesse caso, as variações de tempo, comprimento e massa se tornam desprezíveis ou não detectáveis na área da Mecânica Clássica. Para o caso da Mecânica Relativista, essas variações são identificadas pelo fato do fator de Lorentz (γ) ser maior que a unidade, em consequência das altas velocidades dos corpos (LORENTZ, EINSTEIN & MINKOWSKI, 1958).

Uma abordagem relevante neste trabalho são os desenvolvimentos dos postulados relativísticos e as demonstrações a respeito das variações observados na contração do comprimento e dilatações do tempo e da massa com implicações que levaram aos conceitos de tempo e espaço na Física tratados na relatividade especial.

No caso da relatividade restrita, são tratados problemas que mostram a detecção dos muões na superfície terrestre que podem ser verificados devido a dilatação temporal e a vida média do muon (FAUTH *et al.* 2010) e contração de comprimento descoberto por César Lattes (HAMBURGER; LATTES, 2005). O decaimento das partículas de múons que foram por ele verificado na superfície da terra leva a considerar e confirmar os postulados da relatividade e suas consequências relacionadas a respeito do tempo, espaço e massa.

Tendo em vista esse contexto, o trabalho objetiva abordar a teoria da relatividade considerando os resultados que os postulados conduzem a contração de espaço e dilatações de massa e tempo, considerando ainda os múons, com alguns problemas de aplicação. Outro fato é explicar e mostrar as comparações entre as duas teorias: ligadas a Relatividade Especial desenvolvida pelo físico Albert Einstein e Mecânica Clássica, verificando para o caso da energia, que se pode a partir da relação de energia relativística

com aplicação da série de Taylor, recai-se às formulações da energia cinética, bem como as invariâncias de tempo, massa e comprimento.

Assim sendo, por meio dessa abordagem, procura-se criar um diálogo entre as duas teorias. A primeira relacionando com os princípios da Mecânica Clássica e a segunda, com os postulados da relatividade e suas consequências que a partir do princípio da correspondência, chega-se, a partir do geral, e sob certas particularidades, nas formulações matemáticas previstas pela Mecânica Newtoniana.

PROPOSTA DE EINSTEIN PARA O CONCEITO DE ESPAÇO E DO TEMPO

Nessa seção, procura-se apresentar os postulados da relatividade e suas consequências de espaço, tempo e massa. Assim sendo, para melhor compreender como o espaço e o tempo variam para as altas velocidades, utilizam-se os postulados da relatividade para mostrar como o comprimento na direção unidimensional e o tempo variam em função da velocidade relativa para dois observadores em sistema de referência inercial.

A proposta de Einstein

Einstein sugeriu uma mudança começando pelo conceito estabelecido do espaço e do tempo; tal mudança significava que o tempo e o espaço não eram mais absolutos como era sugerido pelos pilares da Mecânica Newtoniana (OSTERMANN; RICCI, 2002). Para compreender melhor os resultados da proposta de Einstein, considere dois relógios A e B, localizados lado a lado ambos com suas horas, minutos e segundos perfeitamente sincronizados. Supõe-se que o relógio B é posto em um avião e o relógio A deixado no mesmo ponto inicial, o relógio B faz um longo voo antes de ser trazido de volta para o lado do relógio A.

Nesse caso, a questão é entender se os dois relógios estarão perfeitamente sincronizados ou se haverá uma discrepância ou defasagem temporal. Para a Física Clássica, torna-se evidente que ambos estarão sincronizados; pois o tempo é absoluto e igual para os dois, mesmo que um esteja dentro de um avião e o outro ainda no ponto inicial (POLITO, 2016).

Para Albert Einstein o tempo não seria absoluto porque o relógio que estava dentro do avião chegaria atrasado; isso porque para ele, o tempo é relativo e não homogêneo, e está relacionado com o espaço percorrido de cada um. O outro ponto é que o evento aconteceria em um determinado período de tempo para um observador e para outro observador que analisa o mesmo evento, o tempo seria outro (FAUTH *et al.*, 2007).

A ideia crucial que leva a dilatação temporal está ligada a velocidades próximas à luz para que fosse possível constatar esse resultado; logo o tempo e o espaço passariam a ser relacionado um para com o outro e os conceitos dados por Newton para o espaço e o tempo leva a conclusões particulares e não verificável para corpos que possuem velocidades muito baixa em comparação com a velocidade da luz. (POLITO, 2016).

Postulados ou princípios da relatividade

Einstein considerou dois importantes postulados que resultaram em consequências conceituais no espaço e tempo. Os postulados foram assim enunciados: “As leis da Física são as mesmas em todos os sistemas de referências inerciais” e “Os processos da Natureza decorrem igualmente em todos os sistemas inerciais de referência.” (SEIXAS, 2006).

Esse postulado refere-se aos sistemas inerciais de referência, devendo ser iguais às leis da Física. Todos os referenciais inerciais e cujo conceito tinha sido mencionado por Isaac Newton na Física Clássica. O segundo postulado estabelece que não há um referencial inercial preferencial. Todavia se é realizado um experimento em relação a um sistema de referência inercial, o que se obtiver no resultado deve ser o mesmo para qualquer outro referencial em movimento retilíneo e uniforme em relação ao primeiro. O conceito da relatividade da Mecânica Clássica, em que as leis da Mecânica são as mesmas para todos os referências inerciais, foi esticado por Einstein a todas as leis da Física. Conseqüentemente, isso só foi possível graças a alteração nos conceitos já estabelecidos de espaço e tempo (BASSALO; CARUSO, 2013).

Para o segundo postulado, condiz com a ideia de que a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c para todos os sistemas de referência inerciais. Ou seja, a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais de referência. Esse segundo postulado estabelece a velocidade da luz como iguais a todos observadores e únicos sem mudanças. Ambos os postulados trouxeram consequências como dilatação do tempo, contração do comprimento e dilatação da massa, sendo uma das consequências a mais drástica; o fato de que a medida do tempo não é a mesma em dois referenciais inerciais; se é medido o tempo decorrido entre dois eventos em um referencial, e da mesma forma é medido o mesmo evento em outro referencial também inercial, mas que se move em relação ao primeiro, essas duas medidas vão dar resultados diferentes (EINSTEIN *et al.*, 1958).

Foram conceitos simples e conhecidos que Einstein usou para demonstrar a sua teoria; o postulado: “A Constância da Velocidade da Luz no Vácuo” foi extremamente

definitiva para o desenvolvimento da teoria relativística, possibilitando a conclusões e ideias centrais a respeito do entendimento e maneira diferentes de observar a natureza. No vácuo, a velocidade da luz é de aproximadamente $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, o que a torna a velocidade limite da natureza de modo que apesar do corpo estiver submetido a altas energia, a velocidade não cresce indefinidamente como acontece na Mecânica Clásica cuja energia cinética aumenta quadraticamente com aumento da velocidade, No entanto, na relatividade, essa a luz tem um limite c , embora a energia aumente até a altos valores (LANDAU & RUMER, 1979).

Transformação de Lorentz

Na transformação de Lorentz não há relação absoluta do tempo e do espaço, o que existe é uma ligação total entre o espaço e tempo (BARROS, A. *et al*, 2005). Ao considerarmos x_1, x_2, x_3 e t , coordenadas de um acontecimento no dia a dia, para poder conectar as coordenadas nos dois sistemas de referência é preciso usar a teoria da relatividade, onde encontraremos a transformação que nos faz mudar de um referencial para outro: $(x, y, z, t) \rightarrow (x', y', z', t')$ (LESCHE, 2005).

Usa-se para isso transformações lineares, o que significa ter as seguintes propriedades: a) O movimento do sistema B é retilíneo e uniforme, então o sistema A em relação a B possui as mesmas características do movimento que é retilíneo uniforme; b) Como, ao ser emitido, um feixe de luz se propaga com velocidade c , portanto, se esse feixe for emitido quando $t = t' = 0$ coincidem nas origens, a transformação de Lorentz obedece a esses critérios. A validade da transformação de Lorentz dados dois observadores que se deslocam com velocidade relativa v , sendo o primeiro S em repouso em relação o referencial inercial e o segundo S' , deslocando-se com velocidade v , a posição para x' para o observador S' não deve ser a mesma posição, como se verifica na Mecânica Clássica. Devido a alta velocidade v com que o corpo se desloca, existe um fator que modifica a transformação de Galileu Galilei⁶.

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}(x - vt) = \gamma(x - vt) \quad (1)$$

6

<https://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/RR/node2.html?msclkid=89ddabe8ba9611ec9055ef4afeb947e1>

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \quad (2)$$

$$y' = y \quad (3)$$

$$z' = z \quad (4)$$

As transformações inversas são

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x' - vt') = \gamma (x' - vt') \quad (5)$$

$$y' = y \quad (6)$$

$$z' = z \quad (7)$$

Como era de se esperar, essas últimas são obtidas das anteriores pela substituição

$$v \rightarrow -v \quad (8)$$

Finalmente, pode-se verificar que,

$$\frac{v}{c} \ll 1 \quad (9)$$

Pode-se escrever, com boa aproximação, utilizando as equações

$$x' = x - vt \quad (10)$$

Se o tempo for absoluto, supõe-se que,

$$t' = t \quad (11)$$

Nesse caso, observa-se que o fator de Lorentz, tende para o seguinte valor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow 1 \quad (12)$$

Verifica-se nesse desenvolvimento que a contração de comprimento acontece na direção do movimento, razão que explica que as expressões (6) e (7) permanecem inalteradas. As expressões (1) e (2) que evidenciam a presença do termo

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

que representa a constante de Lorentz, mostra que para pequenas velocidades, esse valor tende a unidade como mostra o resultado dado por (12).

As consequências dos postulados da relatividade

Esta seção aborda o desenvolvimento das expressões de dilatação do tempo e massa, além da expressão de contração do comprimento quando corpos estão sujeitos a

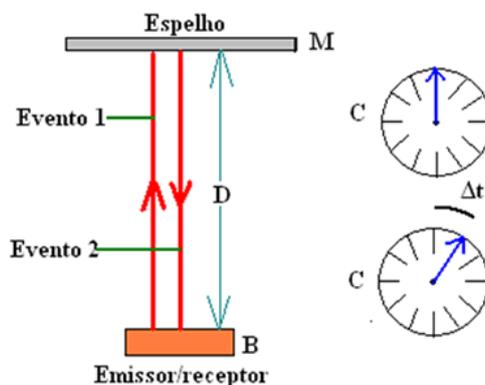
velocidades próximas a da luz. Em seguida, serão apresentadas duas aplicações envolvendo o tema em estudo.

1 - Dilatação do tempo

Os conceitos formulados na Teoria da Relatividade afirmam que objetos, quando em movimento (variação da velocidade), sofrem variação no tempo, ou seja, sofrem dilatação do tempo. Dessa forma, dizemos que o tempo para uma pessoa que se encontra em uma nave espacial, cuja velocidade é alta, passa mais devagar do que o tempo marcado por uma pessoa que viaja a uma velocidade relativamente baixa.

Vamos imaginar que uma pessoa A (utilizando uma fonte luminosa, um espelho, um detector e um relógio) viaje em um trem com velocidade constante em relação a uma estação. Como mostra a figura 1, para marcar o tempo gasto para um feixe de luz sair do emissor B, chegarem ao espelho (M), ser refletido e chegar ao ponto B novamente, há a dependência da distância que separa o emissor do espelho. Então, podemos expressar esse tempo através da equação: $\Delta t = 2D/c$. Como o evento ocorre no mesmo referencial, a pessoa A precisa apenas do relógio C para marcar o tempo.

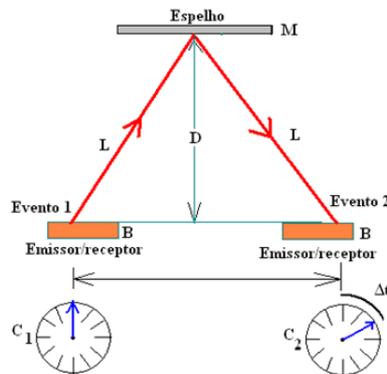
Figura 1: Uma pessoa A marca o tempo gasto para um feixe de luz sair do emissor B, chegar ao espelho (M), ser refletido e chegar ao ponto B novamente.



Fonte: <https://alunosonline.uol.com.br/fisica/dilatacao-do-tempo.html>.

Ao analisar o evento marcado pelo observador B que está na referencial estação, por onde o trem passa, percebe-se que o equipamento emissor se desloca junto com o trem enquanto a luz se propaga. Para o observador B o percurso é como mostrado na figura 2. O observador vê o evento acontecendo em pontos diferentes do seu referencial. Portanto, ele precisará de dois relógios sincronizados para medir o tempo do acontecimento do evento.

Figura 2: Para o observador na plataforma, os dois eventos ocorrem em pontos diferentes do seu referencial



Fonte: <https://alunosonline.uol.com.br/fisica/dilatacao-do-tempo.html>

Embora o postulando de Einstein diga que a luz se propaga com a mesma velocidade, tanto para a pessoa A quanto para a pessoa B, esta viaja não mais a uma distância D e sim $2L$, entre os eventos. Portanto, o tempo marcado pela pessoa B entre os dois eventos é:

$$\Delta x = 2 \cdot \sqrt{D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t'}{2}\right)^2} \quad (13)$$

logo,

$$\Delta t' = \frac{\Delta x}{c} \quad (14)$$

Dessa forma, substituindo (13) em (14), tem-se que,

$$\Delta t' = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t'}{2}\right)^2} \quad (15)$$

O objetivo consiste em explicitar o $\Delta t'$ em função do intervalo de tempo próprio Δt . Elevando ao quadrado a expressão (15) e fazendo ajustes, tem-se que:

$$(\Delta t')^2 = \frac{4}{c^2} \cdot \left[D^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t'}{2}\right)^2 \right]$$

$$\begin{aligned}
(\Delta t')^2 - \frac{4}{c^2} \cdot \left(\frac{v \cdot \Delta t'}{2} \right)^2 &= \frac{4}{c^2} \cdot D^2 \\
(\Delta t')^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{4} \cdot \frac{4}{c^2} \right) &= \frac{4}{c^2} \cdot D^2 \\
(\Delta t')^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) &= \frac{4}{c^2} \cdot D^2
\end{aligned} \tag{16}$$

Extraindo a raiz quadrada em (16), obtém-se:

$$\Delta t' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2D}{c} \tag{17}$$

Como,

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \tag{18}$$

substituindo (18) em (17), vem que:

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \tag{19}$$

A expressão (19) evidencia a dilatação temporal prevista pelo postulado da relatividade e deve coincidir com o princípio da correspondência, isto é, a dilatação temporal deve ser absoluta quando se considera a Mecânica Clássica. Assim, se o objeto possui velocidade muito baixa, tem-se que,

$$\frac{v^2}{c^2} \rightarrow 0 \tag{20}$$

logo, a expressão em (19), transforma-se em,

$$\Delta t' = \Delta t \tag{21}$$

o que está de acordo com a Mecânica Clássica.

É interessante verificar nesse ponto que a Física Relativística particulariza a Mecânica Clássica tendo em vista o princípio da correspondência. Para que isso seja possível, faz-se um desenvolvimento polinomial no fator de Lorentz, considerando que a velocidade seja muito menor que a velocidade da luz. Esse desenvolvimento possibilita obter a partir das expressões relativísticas nas expressões clássicas, como se verá nesse contexto para o caso da energia relativística para a transformação à energia cinética clássica.

Para comprovar que o tempo é absoluto na Mecânica Clássica, a expressão (20) mostra que o quadrado da razão entre as velocidades da luz e da partícula tende a zero,

justificando que, sob essa condição, recai-se no tempo absoluto como mostra a expressão (21) e como afirma a Mecânica Newtoniana (GRANT, 2007).

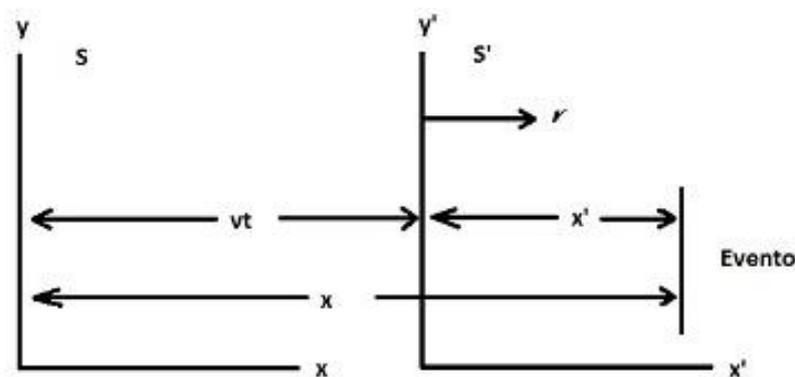
2 - Contração do comprimento

A contração do comprimento é mais uma consequência que se verifica na direção do movimento do corpo quando os referenciais são considerados inerciais. Se o objeto está em repouso em relação ao referencial inercial, tem-se o tempo próprio (L_0). Para outro referencial que se move em relação ao objeto, tem-se o comprimento menor (na direção do movimento). Ao observar uma barra que está em repouso para o referencial S, onde uma de suas pontas está em x_2 e a outra ponta está em x_1 , tendo como comprimento próprio o comprimento da barra

$$L_0 = x_2 - x_1 \quad (22)$$

Para o referencial S' , uma barra se move na direção OX a uma velocidade de módulo v , a barra tem comprimento $L = x'_2 - x'_1$ no referencial S' . Em um instante t'_2 a posição de uma das pontas é x'_2 e x'_1 é a posição de uma das pontas no instante $t'_1 = t'_2$ onde são medidos no referencial S' ; o instante t_2 é diferente de t_1 . Na figura 3, tem-se o resultado aplicando a Transformação de Lorentz.

Figura 3- Movimento de S' em relação a S e a relação e variação do espaço e tempo.



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transformacao-lorentz.htm>

De acordo com a transformação de Lorentz dada pela expressão

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (23)$$

e como S se movimenta em relação a S' com velocidade $-v$, a transformação inversa de Lorentz, tem-se que de acordo com a expressão

$$x = \gamma(x' + vt')$$
 (24)

Levando (24) em (22) e fazendo o desenvolvimento matemático, vem que,

$$L_0 = x_2 - x_1 = \gamma(x'_2 + vt'_2) - \gamma(x'_1 + vt'_1)$$

Distribuindo o termo γ , tem-se que,

$$L_0 = \gamma x'_2 + \gamma vt'_2 - \gamma x'_1 - \gamma vt'_1$$

Agrupando os termos em x' e t' , vem que,

$$L_0 = \gamma(x'_2 - x'_1) + \gamma v(t'_2 - t'_1)$$
 (25)

Considerando que,

$$t'_2 - t'_1 = 0$$
 (26)

e

$$x'_2 - x'_1 = L$$
 (27)

Substituindo (26) e (27) em (25), vem que,

$$L_0 = \gamma L$$
 (28)

Como $\gamma > 1$, temos que $\gamma L_0 > L$, ou seja, há uma contração do comprimento na direção do movimento. É curioso pensar que uma partícula ao se deslocar a alta velocidade, o comprimento diminui na direção do movimento, como observado com a introdução do fator de Lorentz na expressão (28). Na Mecânica Newtoniana não se observa essa contração de comprimento (TORRE, 1998).

3 - Dilatação de massa relativística

Segundo a Mecânica Clássica, aplicando-se em um corpo uma força, pode-se aumentar sua velocidade indefinidamente. Entretanto, na Relatividade isso não é possível, pois a velocidade da luz é a velocidade limite do universo. O que significa que, à medida que a velocidade de um corpo aumenta, sua inércia aumenta e tende a ficar infinitamente grande quando a velocidade do corpo tende à velocidade da luz. Seja então m_0 a massa de um corpo em repouso em relação a um sistema de referencia inercial e m sua massa quando dotado de velocidade v , as massas m e m_0 relacionam-se por:

$$m \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_0$$
 (29)

Tendo em vista a expressão dada por (12) e substituindo em (29), obtém-se que,

$$m \cdot \frac{1}{\gamma} = m_0$$

ou

$$m = \gamma m_0$$
 (30)

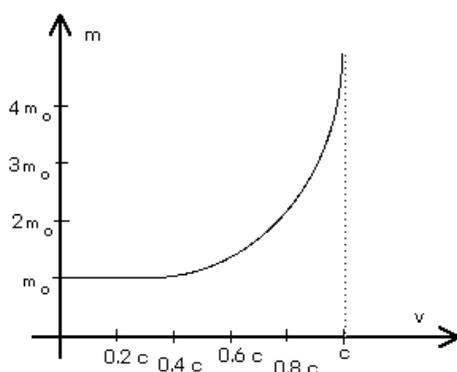
Se levar em conta a velocidade do corpo dentro do campo da Mecânica Clássica, tem-se que não há aumento de inércia quando o corpo aumenta a velocidade, pois a constante de Lorentz tende a 1 para $v \ll c$. No entanto, a alta velocidade acontece o aumento e o valor γ aumenta consideravelmente até muito próximo da velocidade da luz. No caso para objeto de massa m , o objeto nunca atinge o valor da velocidade da luz, pois se isso acontecer, γ cresce, tendendo a infinito (HEISENBERG, 2000).

Sendo assim, nenhuma partícula ou qualquer objeto ou corpo de massa m pode atingir a velocidade da luz. Apenas partículas, como fóton que não tem massa de repouso pode viajar com a velocidade da luz. O fato da partícula aumentar a sua massa com o aumento de velocidade até um valor limite de velocidade, pode ser explicado considerando a energia relativística o que esclarece que massa e energia se encontram intrinsecamente relacionada por meio da expressão,

$$E = m \cdot c^2 \quad (31)$$

Nesse caso, apesar um aumento considerável de energia que o corpo pode receber, a velocidade do corpo nunca ultrapassa o valor c , como se percebe na figura 4, (CHREIM, CAVASSO FILHO, 2019).

Figura 4- O aumento de energia massa a velocidade limite próximo de c .



Fonte: <https://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1160/Ch27SpR1/Mass.html>

4 - Aplicações da Mecânica Relativística

A seguir, serão apresentadas duas aplicações que fazem uso das expressões desenvolvidas anteriormente.

1 – Uma nave se desloca com velocidade $v = 0,8c$, em relação à Terra. Um observador situado na nave nota que um evento que ali ocorre dura um intervalo de tempo de 30 s. Qual é o intervalo de tempo relativo a este evento medido por um observador na Terra?

Solução:

Conduzindo ao valor dado no exemplo, obtém-se,

$\Delta t' = ?$ (Representa o tempo não próprio)

$\Delta t = 30s$ (Representa o tempo próprio)

$v = 0,8c$

Perceba que

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,64}} = \frac{1}{\sqrt{0,36}} = \frac{1}{0,6}$$

Substituindo na equação (19), segue que,

$$\Delta t' = \gamma \Delta t = \frac{1}{0,6} \cdot 30 = 50s$$

Assim, o intervalo de tempo relativo a este evento medido por um observador na Terra é 50 segundos.

2 – Considerando um móvel que se desloca a uma velocidade correspondente a 60% da velocidade da luz, atravessando uma distância igual a 10 km, medida por um referencial em repouso, determine a distância percorrida por esse corpo em movimento.

Solução:

Quando a velocidade de um corpo é próxima à velocidade da luz (c), a distância por ele percorrida sofre uma contração e pode ser calculada por meio da equação (28).

Seja:

$L_0 = 10 \text{ km}$ (Distância observada pelo referencial em repouso)

$v = 60\%c = 0,6c$ (Velocidade do corpo)

$L = ?$ (Distância percorrida pelo corpo em movimento)

Perceba que

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{1}{\sqrt{0,64}} = \frac{1}{0,8}$$

Dessa forma, segue que,

$$L_0 = \gamma L \Rightarrow 10 = \frac{1}{0,8} \cdot L \Rightarrow L = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ km}$$

Assim, o corpo em movimento percorrerá uma distância igual a 8 km.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo buscou apresentar teoria da relatividade e seus postulados, apresentados por Einstein, que trouxeram uma nova forma de ver a Física, sem distorcer todos os princípios já estabelecidos pelo conhecimento científico concretizado pela Mecânica Clássica, mostrando as consequências no campo temporal e espacial como a dilatação do tempo e contração do espaço para referencias distintos. Sua importância é notada não só por mostrar que o conhecimento sempre pode ser buscado e encontrado, pois no final do século XIX os físicos e matemáticos acreditavam que todo o conhecimento sobre a natureza e os fenômenos que os regem, já estavam esclarecidos e não existia nada a ser acrescentado; até surgir a Teoria da Relatividade, mostrando o contrário.

Os conceitos surgidos a partir dos postulados relativísticos só podem ser percebidos quando a velocidade do evento observado é alta tendo como referência para velocidade a da luz, uma das razões para que não tivesse sido perceptível na Mecânica Clássica a Relatividade de Einstein, já que estudava evento e corpos com velocidades baixas. No cotidiano lidamos como velocidades baixas, as mesmas usadas pela Mecânica Clássica para explicar a natureza, como a velocidade de um carro, de um avião ou até mesmo do som, o que torna as consequências dos postulados da relatividade (dilatação do tempo e contração do espaço, por exemplo), não perceptíveis no dia a dia. Porém, os estudos relativísticos são importantes no campo da astrofísica e na física de partículas.

Embora a relatividade tenha sido testada e esteja correta, ainda é limitada a percepção de seus conceitos em nossa rotina diária, pois nossos movimentos se dão a velocidades baixas; a Física de partículas é uma forma de perceber e usar os postulados da relatividade; atualmente os aceleradores de partículas é uma realidade ao redor do mundo. São mecanismos criados com a finalidade de acelerar partículas a velocidades próximas da luz que são lançadas contra átomos que em consequência libera energia que os mantem ligadas. Ao analisar esse evento a Teoria da Relatividade de Albert Einstein precisa ser levada em consideração além dos aceleradores outra forma de validar a teoria relativística é o sistema de localização por satélite como por exemplo o GPS e NAVSTAR em que ambos realizam medidas que usam a Física relativística. São inúmeras as

contribuições de Albert Einstein para a Física e até hoje continua ajudando a vida de todos nós.

REFERÊNCIAS

- BARROS, A.; MONTE, E. M.; ARAÚJO, I. G.; OLIVEIRA, J. C. T.; VIEIRA, S. **Sobre a contração de Lorentz**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 621 - 623, 2005.
- BASSALO (J. M. F.); CARUSO (F). **Einstein**. São Paulo, Livraria da Física, 2013.
- BREWSTER, Hilary D. **Electromagnetism**. Jaipur, India: Oxford Book Co., 2010.
- CHREIM, Jose Rodolfo; CAVASSO FILHO, Reinaldo Luiz. **Velocidade limite c**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 3, e20180341, 2019.
- EINSTEIN, Albert. *et al.* **Textos Fundamentais da Física Moderna**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1958.
- EISBERG, Robert Martin. **Fundamentos de Física Moderna**. Editora Guanabara Dois S.A. – Rio de Janeiro, 1979.
- 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, 2010.
- FAUTH, A. C.; PENEREIRO, J. C.; KEMP, E.; GRIZOLLI, W. C.; CONSALTER, D. M.; 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.
- GLEICK, James. **Isaac Newton, uma biografia**. Companhia das Letras, SP, 2004.
- GRANT, E., **A History of Natural Philosophy from the Ancient World to the Century**, Cambridge University Press 2007.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R. e KRANE, K. S. **Física 3 – Eletromagnetismo**. 4ª ed. – Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- HAMBURGER, A. I. LATTES, **Físico Brasileiro**. REVISTA USP, São Paulo, n.66, p. 132-138, junho/agosto 2005.
- HARIHARAN, P. ed., **“Selected Papers on Interferometry”**, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1991.
- HEISENBERG, W. **A parte e o todo**. Editora Contraponto, 2000.
- LANDAU, L. & RUMER, Y. **O que é a teoria da relatividade**. São Paulo: Hemus, 1979

LORENTZ, H. A., EINSTEIN, A. e MINKOWSKI, H. **Textos Fundamentais da Física Moderna**, I volume - **O Princípio da Relatividade** (3ª. edição), Editora da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1958.

NUSSENZVEIG, H Moysés. **Curso de Física Básica**, v.4 p. 249. Editora Edgard Blücher Ltda – São Paulo, 2002.

OSTERMANN, Fernanda; RICCI, Trieste F. **Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física**. Cad. Brás. Ens. Fís. , v. 19, n.2: p176-190, ago. 2002.

PAIS, Abraham. **“Sutil é o Senhor...”: a ciência e a vida de Albert Einstein**. Editora Nova Fronteira – Rio de Janeiro, 1995.

POLITO, A. M. M. **A construção da estrutura conceitual da física clássica**. São Paulo: Livraria da Física, 2016.

SEIXAS, W. **O princípio da relatividade** – De Galileu a Einstein. Revista Brasileira de História da Matemática, v. 5, n. 10, 2006.

TIPLER, Paul A. **Física Moderna**. p. 90; Editora Guanabara Dois S.A. – Rio de Janeiro, 1981.

TORRE, A. C. **Reflexiones sobre la enseñanza de la física moderna**. Educación en Ciencias, v. 2, n. 4, p. 70-71, 1998.

YOUNG, H. D. e FREEDMAN, R. A. **Física III – Eletromagnetismo**. 12ª ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.

Recebido em: 15/10/2022

Aprovado em: 18/11/2022

Publicado em: 22/11/2022