

CONCEITOS GERAIS DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA E GERAL

Caio Olindo de Miranda e Silva Júnior¹, Leticia Thayane Santos Ramos¹, Rafael de Melo Lopes¹

¹Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil
(c.olindo@ict.ufvjm.edu.br)

Este trabalho aborda a Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita) e Geral, onde através de conceitos gerais é possível ter um entendimento básico sobre o assunto em questão. Nestes conceitos são apresentados brevemente a Mecânica Newtoniana, Eletromagnetismo de Maxwell e não menos importante, as Transformações de Lorentz, que é essencial para se compreender a Relatividade Especial. Seguindo para a Relatividade Geral, que é vista como uma generalização da Relatividade Restrita para referenciais não inerciais, a Lei de Newton é base para o postulado. Vale ressaltar também a sua importância para as áreas da Astrofísica e Cosmologia.

Palavras-chave: Relatividade Especial; Postulados da Relatividade; Referenciais Inerciais.

INTRODUÇÃO

As Transformações de Galileu são um conjunto de equações que permitem relacionar as coordenadas espaciais e temporais de um objeto visto de dois referenciais inerciais quando há movimento relativo entre eles. A Teoria da Relatividade de Einstein trata os fenômenos ocorridos nos objetos que se deslocam em velocidades muito altas. A Teoria Restrita, proposta em 1905, aborda a comparação entre os movimentos observados em diferentes referenciais que se movem com velocidade constante uns em relação aos outros. Em 1687, Newton (1643-1727) foi o primeiro a generalizar as observações de Galileu e outras leis de movimento que são abordadas nos cursos de mecânica clássica. As leis de Newton se aplicam apenas em referenciais inerciais (onde a lei da inércia é válida). Essas leis têm a mesma forma em qualquer referencial que se move com velocidade constante em relação a um referencial inercial, de modo que todos os referenciais inerciais são equivalentes. Por volta de 1860, Maxwell (1831-1879) descobriu que as leis obtidas empiricamente da eletricidade e do magnetismo podem ser descritas por quatro equações matemáticas, as Equações de Maxwell. Essas equações não são invariantes em relação a uma Transformação de Galileu entre referenciais inerciais. Uma das características das Equações de Maxwell é a existência de ondas eletromagnéticas, em que a velocidade possui um valor bem determinado, $c = 3 \times 10^8$ m/s. A concordância entre este número e o valor experimental da velocidade da luz além das propriedades de polarização previstas para as ondas eletromagnéticas e as observadas da luz sugere um

forte indício de que a luz é uma onda eletromagnética. Por comparação com as outras ondas conhecidas, foi enunciado que as ondas eletromagnéticas se propagam em meio material. Este meio de propagação recebeu o nome de éter, a sua nomenclatura foi sugerida por Aristóteles há mais de 2000 anos. Já a Relatividade Geral é uma generalização da Relatividade Restrita para referenciais não inerciais, essa teoria descreve a interação gravitacional. Trata-se de uma teoria mais complexa, do ponto de vista matemático, do que a Teoria da Relatividade Restrita. A Relatividade Geral tem grande importância nas áreas da astrofísica e cosmologia e é bastante útil na criação de sistemas como GPS, relógios atômicos e comunicações de sondas espaciais e sistemas precisos que podem vir a ser criados. O que levou Einstein (1879-1955) a formular uma Teoria da Relatividade Geral não foi um resultado experimental que precisasse de explicação na Relatividade Restrita, mas sim o desejo de incluir na Teoria da Relatividade a descrição de todos os fenômenos naturais (TIPLER, 2014). De acordo com a teoria da Relatividade Geral, se a gravidade se torna tão suficientemente grande, a sua atração se torna tão intensa que nada pode escapar, nem mesmo a luz e outras formas de radiação eletromagnética, é como se o espaço estivesse encolhendo mais rápido do que a luz consegue se propagar. Uma curiosidade notável de um corpo desse tipo, conhecido como buraco negro, é que nada do que acontece no interior pode ser comunicado com o resto do universo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para entendermos melhor sobre o que é a Relatividade Especial precisamos ter um breve conhecimento da Mecânica Newtoniana e alguns conceitos sobre Eletromagnetismo de Maxwell, além de tentarmos compreender um pouco as Equações de Lorentz. E para a Relatividade Geral, estudaremos o Princípio da Equivalência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Mecânica Newtoniana é baseada nas três leis de Newton, são elas: 1ª- lei da inércia, 2ª- lei da força, 3ª- lei da ação e reação, essas leis são válidas para os referenciais inerciais. Esses referenciais inerciais são definidos pela primeira lei (lei da inércia), o que nos garante que todo corpo permanece em seu estado de repouso ou em movimento retilíneo e uniforme caso as forças que atuem sobre ele se anulem. Desse modo, na Mecânica Newtoniana, todos os referenciais inerciais são equivalentes (SEARS, 2008). A segunda lei nos diz que para todo corpo submetido a uma ou mais forças em que a soma seja diferente de zero, este vai estar sujeito a uma aceleração proporcional à força resultante e inversamente proporcional à sua massa.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a} \quad (1)$$

Uma importante observação é que esta lei só é válida para um referencial inercial. A terceira lei nos diz que se um corpo aplicar uma força sobre um segundo corpo, o segundo exercerá uma força contrária ao primeiro corpo de mesmo módulo e direção.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \quad (2)$$

O Eletromagnetismo de Maxwell deu início com o estudo da comparação do fluxo de fluidos incompressíveis com os campos observados por Faraday (Millar, 1996). Ele então desenvolveu um modelo de fenômenos eletromagnéticos usando o conceito de campos e vórtices, análogos aos observados em líquidos, representando intensidade magnética e corrente elétrica. Depois disso, ele introduziu elasticidade ao fenômeno e mostrou que as ondas transversais se propagam com as conhecidas constantes fundamentais do eletromagnetismo. Maxwell calculou que as ondas se propagariam com uma velocidade muito próxima à velocidade da luz. A partir disso, ele concluiu que a luz pode ser entendida como ondas eletromagnéticas transversais em um meio hipotético ("éter"). Para aprofundar o estudo das ondas eletromagnéticas, formalizou-se

uma analogia com uma descrição puramente matemática de campos eletromagnéticos com escoamento de fluidos. Em 1864 ele desenvolveu as equações fundamentais do eletromagnetismo, agora conhecidas como Equações de Maxwell, e foi então capaz de mostrar como as ondas eletromagnéticas se comportavam em relação aos campos elétricos e magnéticos, oscilando em ângulos retos entre si e com a direção de propagação. Além disso, Maxwell argumentou que a luz corresponde a uma pequena parte do espectro das ondas eletromagnéticas existentes.

As Transformações de Lorentz (1853-1928) permitiram que as Equações de Maxwell fossem inalteradas, contanto que se alterem as componentes dos campos. Lorentz não descobriu as fortes consequências da relatividade, pois ainda acreditava na existência do éter, tentando ajustar sua transformação. Vamos considerar o seguinte caso entre as coordenadas do espaço-tempo x, y, z e t de um evento em um referencial S e as coordenadas x', y', z' e t' do mesmo evento em um referencial S' que esteja se movendo com velocidade uniforme em relação a S (H. A. Lorentz, 2014). Para simplificar os cálculos vamos considerar que a origem dos dois sistemas de coordenadas coincidem no instante $t = t' = 0$ e S' está se movendo em relação a S com velocidade v ao longo do eixo x (ou x') e os eixos y' e z' paralelos aos eixos y e z . As transformações corretas para um referencial inercial movendo-se com velocidade v ao longo do eixo x em relação a outro referencial inercial são:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (3)$$

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

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

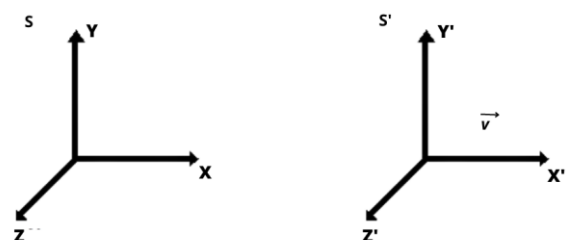


Figura 1 - Referenciais inerciais movendo-se um em relação ao outro.

As transformações nas direções y e z são as mesmas, visto que o movimento só se dá na direção x . Além do fator de Lorentz (*gama*), a diferença desta transformação é que o tempo depende da posição e da velocidade, deixando a ideia de módulo absoluto. Se a velocidade dos corpos for muito menor que a velocidade da luz, $v \ll c$, a Relatividade de Galileu se torna um caso particular da Relatividade Especial. O fator γ , que depende basicamente da razão v/c , desaparecerá.

A Teoria da Relatividade Restrita pretende consolidar uma modificação da Mecânica Newtoniana para coincidir com o Eletromagnetismo de Maxwell. A Relatividade Especial pode ser entendida como uma reformulação da mecânica clássica. A Relatividade Especial tem como base dois postulados:

- Todas as leis da natureza são as mesmas em todos os sistemas de referenciais inerciais;

- A velocidade de propagação da luz no vácuo é a mesma em todos os sistemas de referenciais inerciais (299792458 m/s).

Vale ressaltar que a Relatividade Especial também possui uma restrição, que se dá pelo fato de apenas se estender para referenciais inerciais. Ao aplicar estes postulados a mecânica resultante tem várias propriedades interessantes:

- Quando a velocidade dos objetos considerados são muito menores que a velocidade da luz, as leis são as descritas por Newton;

- O tempo e o espaço deixam de ser invariantes ao mudar de sistema de referência, passando a ser dependentes do estado de movimento dos observadores;

- O eletromagnetismo não é um conjunto de leis que necessite de uma transformação diferente da aplicada em mecânica;

- Os intervalos temporais entre acontecimentos dependem do sistema de referência em que estes são medidos. As distâncias entre ocorrências também.

A discordância principal da Relatividade Especial em relação à Relatividade de Galileu é o postulado da constância da velocidade da luz. Dentro da Mecânica Newtoniana, o tempo é concebido como absoluto, que flui uniformemente e não depende de observadores em diferentes referenciais. Já na Relatividade de Einstein, como a luz é tida como uma constante e possui um alto valor, a questão de simultaneidade passa a ser relativo, ou seja, dois ou mais eventos simultâneos em um determinado quadro inercial não são simultâneos em outro quadro inercial. É até possível que a ordem temporal dos eventos seja diferente para observadores colocados em diferentes referenciais inerciais.

Como foi anunciado nos postulados da Relatividade Especial, a velocidade da luz é a única grandeza absoluta em qualquer referencial inercial. E, segundo Einstein, o tempo pode ser distinto entre passado, presente e futuro, dizendo que o tempo é relativo e vinculado à velocidade. Para entendermos melhor as consequências dos postulados vamos imaginar um experimento: um trem move-se com velocidade constante e de intensidade v , em relação a um observador em repouso localizado na plataforma, ou seja, do lado de fora do trem. Para simplificar adotaremos os referenciais da plataforma de S e o do passageiro no trem de S' . No interior do trem o passageiro possui um objeto composto por uma fonte de luz que se mantém fixo no chão, que pode emitir pulsos luminosos de curta duração. Esses pulsos luminosos fazem um trajeto em linha reta na vertical que atinge um espelho fixo no teto e acima da fonte luminosa, e por sua vez o pulso luminoso é refletido de volta para sua fonte, onde existe um detector.

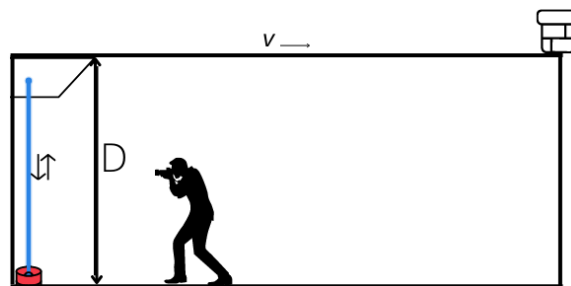


Figura 2 - Luz emitida e recebida de volta na perspectiva do passageiro.

Para calcular o tempo no movimento vertical em relação ao passageiro temos que:

$$t' = \frac{2D}{c} \quad (7)$$

D : altura do trem; $2D$ é a distância percorrida pelo raio de luz.

c : velocidade da luz.

Vamos introduzir a notação Δt_p ao invés de simplesmente t' , que chamamos de tempo próprio do observador. É o intervalo de tempo medido por quem encontra-se no referencial do trem. Tempo próprio é o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem na mesma coordenada.

O que nos basta agora é qual o caminho observado para o pulso de luz quando visto de um referencial na plataforma. Este caminho não é o mesmo observado pelo passageiro dentro do trem, pois, para o observador na plataforma existe o movimento do trem, este movimento precisa ser levado em consideração. Para o passageiro é observado uma trajetória retilínea, já para o observador na plataforma é uma trajetória diagonal. Pelo mesmo raciocínio, podemos calcular o intervalo de tempo

necessário para que a luz possa percorrer a trajetória vista do observador na plataforma.

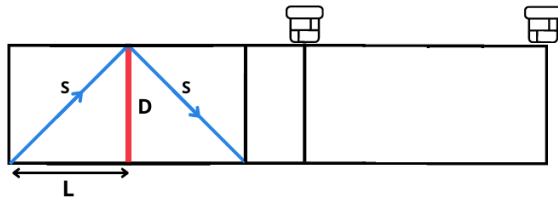


Figura 3 - Luz emitida e recebida de volta na perspectiva de um observador na plataforma.

$$L = \frac{v\Delta t}{2} \quad (8)$$

$$S = \frac{c\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$S^2 = D^2 + L^2 \quad (10)$$

L: metade da distância horizontal percorrida pelo trem;

S: caminho do pulso observado da Terra.

Com essas duas substituições podemos calcular o tempo medido pelo observador em repouso na Terra:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \quad (11)$$

Como resultado das manipulações algébricas, obtivemos:

$$\Delta t = \frac{2D}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (12)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_p \quad (13)$$

O intervalo de tempo medido no referencial S' é diferente do intervalo de tempo medido no referencial S. Em que a diferença é dada pelo fator de Lorentz, ou seja, o tempo próprio é o menor intervalo de tempo entre dois eventos. Isso gera uma consequência direta a respeito das percepções de cada observador. Embora os dois possam admitir os mesmos eventos, que são a emissão e a recepção do pulso luminoso, ambos discordam sobre qual é o intervalo de tempo entre os dois eventos. Podemos dizer que o tempo passa pela mesma razão para dois observadores se os dois experimentam a simultaneidade de eventos, e para ocorrer isso, os dois observadores devem estar em repouso com relação a eles mesmos.

Assim como acontece na dilatação do tempo, a medição de distâncias em diferentes referenciais também é afetada. Com o mesmo princípio,

chamaremos de comprimento próprio a distância entre dois pontos medida de um referencial em repouso. Por outro lado, precisamos de um outro referencial inercial que possa medir tal comprimento e que esteja se movimentando em relação ao primeiro.

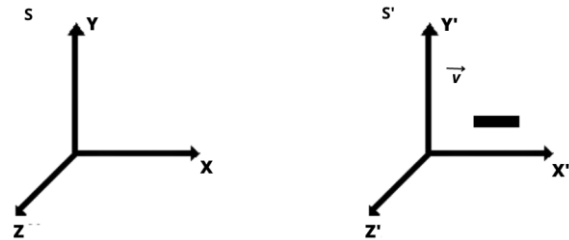


Figura 4: Barra em repouso no referencial S'.

Vamos imaginar um referencial S parado e outro referencial S' com velocidade constante. Observa-se uma barra em repouso no referencial S'. Para que o referencial S possa medir x_1 e x_2 , será necessário que essas medidas ocorram no mesmo tempo, $t_1=t_2$. Para a distância no referencial S' devemos recordar a equação (3): $x' = \gamma(x - vt)$:

$$Lp = x'_2 - x'_1 \quad (14)$$

$$Lp = \gamma[x_2 - x_1 - v(t_2 - t_1)] \quad (15)$$

$$x_2 - x_1 = L \quad (16)$$

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

Lp: comprimento medido no referencial S';

L: comprimento medido pelo referencial S.

O que podemos perceber é que a distância encontrada pelo referencial S é menor que a medida pelo referencial S'. Como gama é maior que 1, L é menor que Lp, portanto Lp é o maior comprimento que um objeto pode ter. Isso é o que chamamos de contração do espaço.

Para a Teoria da Relatividade Geral, Einstein desejava incluir a descrição de todos os fenômenos naturais. Em 1907, o físico notou que estava em condições de conseguir este objetivo, mas com uma única e notável exceção: os fenômenos que envolviam a ação da força da gravidade. Com isso ele gostaria de entender por que ela existe. Einstein conseguiu essa explicação alguns anos mais tarde. Em suas palavras, ele disse: "Foi então que me ocorreu a ideia mais fantástica de minha vida. Da mesma forma que o campo elétrico gerado pela indução magnética, o campo gravitacional possui uma existência apenas relativa. Porque para um observador que está caindo do telhado de uma casa, não existe (pelo menos em sua vizinhança imediata) um campo gravitacional... O observador tem todo direito de imaginar que se encontra em repouso." A partir dessa ideia que Einstein chegou ao Princípio da

Equivalência, que veio a se tornar o postulado básico da Teoria da Relatividade Geral.

Considerando um referencial K_0 acelerado uniformemente em relação a um referencial inercial K com aceleração a . Tendo em vista que inicialmente os relógios estão sincronizados, onde os eixos das coordenadas coincidem e havendo aceleração apenas em um destes eixos coincidentes x . A segunda lei de Newton no referencial inercial K , levando em conta que uma partícula se movimenta neste eixo x sob a ação de uma força F , é:

$$F = m\ddot{x} \quad (18)$$

Na segunda lei de Newton, o referencial acelerado K_0 para a mesma partícula é:

$$F = m\ddot{x} + ma = m\ddot{x} + F_{inercial} \quad (19)$$

Voltando à equação Newtoniana, possuímos dois conceitos de massa:

- Massa inercial: massa que leva em consideração a resistência ao movimento da partícula.
- Massa gravitacional: massa em que o campo gravitacional se acopla.

Um fato empírico importante é que as duas massas são iguais. Galileu e Newton e vários outros mais tarde provaram isso com muita precisão. A igualdade entre massas inerciais e gravitacionais sugere uma estreita relação entre gravidade e inércia. Na equação (19), o termo adicional representa a força inercial devido à escolha de um referencial não inercial para descrever o movimento. A figura 5 possui quatro situações e em seguida será explicado cada situação.

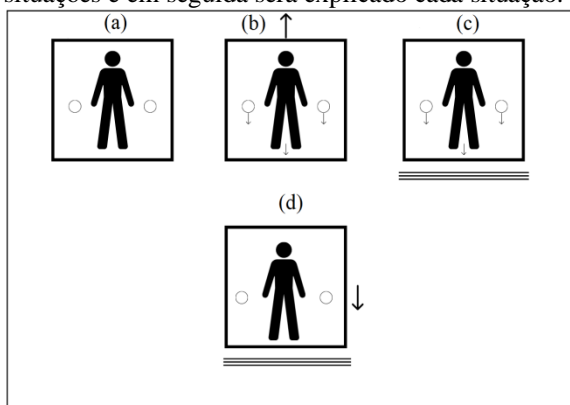


Figura 5: Representação do Princípio da Equivalência.

- Uma pessoa em uma caixa no espaço, afastada de qualquer matéria, livre de qualquer ação de força. Esta pessoa flutua, ao soltar duas massas, ambas permanecerão flutuando junto com ela.
- Vamos assumir que a tal caixa é acelerada para cima constantemente. Então a pessoa é pressionada pelo chão da caixa com uma força constante e o mesmo acontecerá com as duas massas, que agora irão cair no chão.
- Agora vamos considerar a mesma caixa, mas agora em estado estacionário em um campo gravitacional, logo, a mesma pessoa será pressionada pelo chão com uma força constante, as massas irão cair também. Nenhum experimento pode ser feito dentro da caixa com o objetivo de diferenciar se os efeitos estão acontecendo devido a um campo gravitacional ou por conta de uma aceleração para cima.
- Agora considere que tal caixa é colocada em queda livre em um campo gravitacional homogêneo e constante. A pessoa irá flutuar junto com as massas, ela não sente força alguma.

Devemos enfatizar o fato de que as acelerações são constantes e que a caixa é pequena suficiente, do contrário as duas massas irão se aproximar. O Princípio da Equivalência de Einstein nos diz que as massas inerciais e gravitacionais são iguais, e o resultado de qualquer experimento local gravitacional em um referencial em queda livre é independente da velocidade do referencial (Invariância de Lorentz).

A primeira previsão testada da relatividade geral “A deflexão da luz perto de corpos com grandes massas”, que na verdade não era totalmente nova, pois em 1804 o astrônomo Johann Georg von Soldner (1776-1833) já especulava sobre um raio de luz possivelmente ser desviado devido à atração gravitacional, nesse caso descrita pela Lei da Gravitação Universal de Newton. Duas questões importantes são abordadas, uma teórica no sentido de que a teoria diz que esses números ficam cada vez menores conforme consideramos os raios de luz passando cada vez mais longe do corpo celeste, mas ao mesmo tempo eles vão ficando cada vez maiores considerando corpos celestes de massa crescente. Para tornar o efeito o mais visível possível, você precisa de um corpo com a maior massa possível e que os raios de luz passem o mais próximo possível desse corpo. É por isso que falamos sobre o Sol e os raios de luz que passam perto da superfície do Sol. É uma configuração ideal e mesmo assim o número previsto é minúsculo. Outra questão relevante é como observar a luz que passa perto da superfície do Sol, o que parece impossível, já que às vezes é impossível ver qualquer coisa além do Sol e da Lua no céu durante o dia. Uma situação que esclarece o problema de ver essas estrelas durante o dia perto do Sol, que foi resolvido em 1919 por um eclipse total visível em algumas áreas da Terra, inclusive no norte do Brasil. Astrônomos liderados por Arthur Stanley

CONCLUSÃO

Eddington (1882-1944) em Sobral, Ceará, conseguiram observar o fundo estelar próximo ao Sol durante um eclipse total e constataram que as estrelas neste fundo estão em posições diferentes do normal, é como se o Sol atuasse como uma lente, o que confirma a curvatura do espaço causada pela matéria.

O periélio de um planeta é o ponto em sua órbita mais próximo do sol. O fato é que este ponto existe, ou seja, que as órbitas dos planetas não são círculos, mas elipses. A órbita de Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, o precede em 5.600 segundos de arco a cada século (TIPLER, 2014), ou seja, cerca de um grau e meio a cada cem anos, esse fenômeno é teoricamente previsível por cálculo teórico, é complicado, baseado na Lei da Gravitação Universal de Newton, e leva em conta a atração gravitacional dos outros planetas (principalmente Vênus, Terra e Júpiter). A problemática era só poder explicar uma parte dos 5600 segundos de arco por século. Einstein e a Relatividade Geral explicaram os 43 segundos de arco por século que faltavam. No século XIX, o astrônomo Le Verrier (1811-1877) descobriu anomalias na órbita do planeta Urano. Urano, por assim dizer, não "se comportou" bem com a conjectura de Newton. Le Verrier levantou a hipótese de que essas anomalias se davam à presença de outro planeta descoberto posteriormente, Neptuno. As anomalias na órbita de Mercúrio levaram ele então a postular a existência de outro planeta, numa órbita entre o Sol e Mercúrio, e que foi chamado Vulcano. Este planeta nunca foi detectado e a explicação da precessão do periélio de Mercúrio foi talvez a primeira sólida confirmação da Relatividade Geral.

O último dos testes da Relatividade realizado em 1959, foi o desvio para o vermelho, que é sofrido por uma onda eletromagnética que "foge" de um campo gravitacional, que foi executado e concluído com sucesso. Em aspectos físicos, a luz perde energia ao fugir do campo gravitacional, semelhante a uma pedra lançada para cima. Por outro lado, se a luz "cair" em um campo gravitacional, ela ganhará energia da mesma forma que uma bateria em queda ganha energia (energia cinética). Esse fenômeno foi comprovado em 1959 em um experimento de Robert Vivian Pound (1919-2010) e o seu aluno Glen Anderson Rebka, Jr. (1931-2015). Nesse experimento eles conseguiram determinar, no porão dos laboratórios, na Universidade de Harvard, um desvio para o azul de raios gama, que eram emitidos por uma fonte que se localizava no sótão, 22,5 metros acima. Sendo assim, eles conseguiram mostrar que o princípio de equivalência estava de acordo com a experiência.

O trabalho realizado proporciona, com base nos conceitos gerais da Relatividade Especial e Geral, um conhecimento básico sobre o assunto em questão, através de postulados, testes e várias situações que podemos observar no cotidiano. A Teoria da Relatividade Geral é uma generalização da Teoria da Relatividade Especial, de Albert Einstein (1879-1955), levando em conta a aceleração dos corpos, ou seja, é válida para referenciais não inerciais. Já na Relatividade Especial, Einstein mostrou como os fenômenos físicos ocorrem de forma diferente para observadores que se movimentam com velocidades relativas constantes e que a velocidade da luz é igual para todos esses observadores. Além disso, mostrou uma similaridade entre tempo e espaço. De forma geral, essa teoria diz que eventos que ocorrem de forma conjunta para um observador podem ser assíncronos para outro. Dando como exemplo o tempo de um evento, como a queda de um corpo, quando vista por uma pessoa no planeta Terra, pode ser diferente se vista por um observador externo que se movimenta com uma velocidade alta.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que fizeram parte deste estudo, direta ou indiretamente.

REFERÊNCIAS

H. A. Lorentz, A. Einstein e H. Minkowski. **Textos Fundamentais da Física Moderna, I volume - O Princípio da Relatividade**, 6ªed, Editora da Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (2014).

Millar, D. et al. **Maxwell, James Clark (1831-1879)**. Disponível em:

<[https://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/maxwell.htm#:~:text=Maxwell%20calculou%20que%20as%20ondas,hipot%C3%A9tico%20\(%22ether%22\).](https://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/maxwell.htm#:~:text=Maxwell%20calculou%20que%20as%20ondas,hipot%C3%A9tico%20(%22ether%22).>)>. Acesso em 20 de Janeiro de 2023.

TIPLER, P; LLEWELLYN, R. **Física Moderna**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Copyright, 2014. p. 3-67.

SEARS, F; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A., **Física I: Mecânica**. 12a. Ed. Pearson Addison Wesley, vol. I, 2008.