

**COMPREENDENDO A TEORIA DA RELATIVIDADE:  
DOS FUNDAMENTOS ÀS SUAS CONSEQUÊNCIAS**

Alisson Cristian Giacomelli  
Dr. Carlos Ariel Samudio Pérez

Passo Fundo, 2016

## **Apresentação**

A Física, assim como qualquer outra ciência, encontra-se, desde os seus primórdios, em constante evolução. Teorias são frequentemente modificadas, e até mesmo descartadas, sendo substituídas por outras. Essa constante modificação constitui-se na própria natureza de uma teoria científica, ou seja, ela precisa ser falseável. Uma profunda modificação na forma como o meio científico concebia algumas grandezas físicas fundamentais, como espaço, tempo e matéria, ocorreu no início do século XX com a ascensão da teoria da relatividade de Einstein, que se constitui num dos pilares do que ficou conhecido como “Física Moderna”.

A presente obra refere-se a um texto de apoio aos professores de Física do ensino médio, que aborda tanto tópicos de relatividade restrita como de relatividade geral. Buscou-se abordar os tópicos com uma linguagem simples, evitando ao máximo complicações matemáticas, no intuito de tornar a leitura acessível tanto ao professor como ao aluno. Nesse sentido, ao longo do texto, também é sugerida a realização de algumas atividades, como dinâmicas, experimentos mentais e mesmo de laboratório didático, sempre buscando movimentar a estrutura pensante do estudante com o objetivo de propiciar uma melhor compreensão do conteúdo. A utilização do material não precisa, necessariamente, seguir a mesma ordem em que os tópicos estão dispostos no texto. Podem-se selecionar apenas alguns tópicos, com a ressalva de alguns conceitos que são, de certa forma, pré-requisitos para uma melhor compreensão de outros.

Assim, apresenta-se um material que visa facilitar o trabalho do professor, assim como a compreensão por parte dos estudantes em relação à relatividade restrita e geral. Esse material consiste no produto desenvolvido como pré-requisito parcial para a obtenção do título de mestre de um dos autores junto ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECM) da Universidade de Passo Fundo (UPF).

## Sumário

<b>Apresentação .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoria da relatividade restrita .....</b>	<b>3</b>
1.1 Relatividade de Galileu.....	4
1.2 A origem do princípio da relatividade .....	4
1.3 As transformações de Galileu .....	7
1.4 Newton e a relatividade .....	10
1.5 A teoria eletromagnética de Maxwell e a natureza da luz .....	15
1.6 A aparente incompatibilidade entre a Física de Galileu-Newton e a teoria eletromagnética de Maxwell .....	17
1.7 Einstein e a teoria da relatividade restrita .....	21
1.7.1 A relatividade da simultaneidade .....	24
1.7.2 Dilatação do tempo .....	34
1.7.3 Contração das distâncias .....	43
1.7.4 Dinâmica relativística .....	48
1.7.5 Energia relativística .....	49
<b>2 TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL.....</b>	<b>60</b>
2.1 O princípio da equivalência .....	60
2.2 A relatividade do tempo de acordo com a TRG.....	65
2.3 Espaço curvo.....	69
2.4 A deflexão da luz em um campo gravitacional.....	80
2.5 Buracos negros .....	84
2.6 Considerações sobre cosmologia.....	88
<b>SUGESTÃO DE LEITURA COMPLEMENTAR: VIAGENS NO TEMPO .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1 Teoria da relatividade restrita

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955), aos 26 anos de idade, publicou cinco artigos que mudariam para sempre a forma como se entendia o tempo, o espaço e a matéria. Esse ano ficou conhecido, mais tarde, como o *annus mirabilis* (em latim, “ano miraculoso”) de sua carreira, e os respectivos artigos foram:

- “*Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*” (“Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz”). O artigo trata da interação entre a radiação e a matéria, trazendo de volta a interpretação corpuscular para a luz, interpretação esta que era defendida por Newton e que foi abandonada com a ascensão da teoria eletromagnética.

- “*Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*” (“Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares”). Com este artigo, Einstein obteve, em 1906, o título de doutor pela Universidade de Zurique. O trabalho consiste em um novo método para determinar o tamanho de moléculas, entre outras grandezas.

- “*Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*” (“Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor”). Este artigo traz as considerações de Einstein sobre o movimento browniano que foi descrito pela primeira vez por Robert Brown em 1828. O movimento browniano consiste na análise do movimento aleatório de partículas de pólen suspensas em um líquido.

- “*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*” (“Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”). Consiste no primeiro trabalho publicado por Einstein sobre a teoria da relatividade restrita, onde ele traz várias considerações sobre espaço e tempo.

- “*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*” (“A inércia de um corpo depende da sua energia?”). Trata de uma consequência do quarto artigo, onde Einstein chega à conclusão de que é necessário que se assumam a equivalência entre massa e energia. Essa equivalência é expressa na famosa equação:  $E = mc^2$ .

Dentre esses artigos (todos eles contendo considerações importantes para o desenvolvimento posterior da ciência), um em particular modificou significativamente a forma de se pensar sobre tempo, espaço e matéria. Trata-se do artigo “*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*” (“Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”),

que consiste no primeiro trabalho sobre a teoria da relatividade restrita (TRR). A teoria em questão é chamada de “restrita” (ou, dependendo do autor, de “especial”), pois aborda alguns casos especiais em que não existe aceleração, ou seja, referenciais inerciais. Em 1915, Einstein publicou a teoria da relatividade geral (TRG), onde expandiu a TRR para referenciais acelerados.

A TRR levanta algumas considerações que mudaram significativamente a visão que se tinha sobre o mundo físico até então. Antes de sua publicação, as leis da Física eram regidas, basicamente, pela mecânica newtoniana e pelo eletromagnetismo de Maxwell. Porém, essas duas teorias se mostravam aparentemente incompatíveis. A busca por torná-las compatíveis teve como resultado a formulação da TRR. Essa nova teoria trouxe consigo inúmeras consequências sobre o que se entendia como espaço, tempo e matéria, grandezas fundamentais para o entendimento do mundo físico. Neste primeiro módulo, discutiremos os fundamentos que levaram a essa teoria, assim como algumas das suas consequências.

## **1.1 Relatividade de Galileu**

A TRR é baseada, basicamente, em dois princípios: o princípio da relatividade e o princípio da constância da velocidade da luz. O segundo é decorrente da teoria eletromagnética de Maxwell, formulada no século XIX, porém, o primeiro teve origem ainda na Física de Galileu no século XVI. O princípio da relatividade deu base para o desenvolvimento de toda a Física Clássica (como ficou conhecida a Física desenvolvida até o início do século XX). O princípio da relatividade também serviu como base para a elaboração da TRR e ainda hoje é considerado um dos princípios mais bem estabelecidos da Física. Nesse sentido, antes de abordarmos a TRR propriamente dita, vamos apresentar como se deu a formulação do princípio da relatividade e destacar alguns aspectos sobre a Física Clássica.

### **1.2 A origem do princípio da relatividade**

Em nosso cotidiano, frequentemente, é possível observar os corpos se movendo, alguns se movem de forma análoga, já outros de forma totalmente discrepante. A busca pelo entendimento de todos esses estados de movimento é algo que se estende por

séculos. Os primeiros trabalhos nesse sentido remetem a épocas pré-cristãs e cabem ao grego Zenão, de Eléia (500 – 451 a.C.). Zenão explorou várias situações que remetem ao estudo do movimento, e, dentre elas, exploraremos a que mais tarde teve uma explicação mais satisfatória por meio do princípio da relatividade de Galileu.

### Atividade 1: Paradoxo dos bastões em movimento

Vamos reproduzir aproximadamente um dos experimentos de pensamento de Zenão: imagine um bastão M em repouso em relação ao solo e outros dois bastões A e B que se movem com velocidades de módulos e direções iguais e constantes em relação a M, porém, em sentido contrário um em relação ao outro, como mostra a Figura 1:

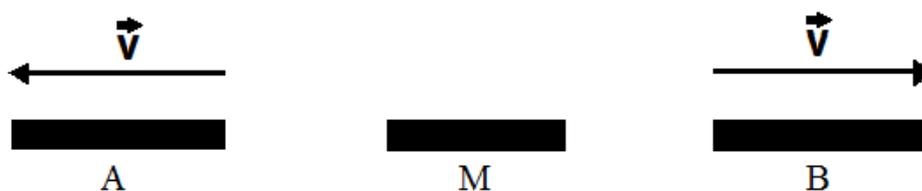


Figura 1: Paradoxo dos bastões em movimento

Suponha que você meça a velocidade de A em relação a M e chegue a um valor de 20 m/s. Posteriormente, você mede a velocidade de B também em relação a M e chega ao mesmo valor, ou seja, 20 m/s.

#### Questões:

- 1) Se a velocidade de B em relação a M é de 20 m/s, qual será a sua velocidade em relação a A?
- 2) Por que a velocidade de B em relação a M é diferente da velocidade de B em relação a A?
- 3) É possível atribuir dois valores diferentes de velocidade para o mesmo corpo? Justifique a sua resposta.

Ainda na Grécia antiga, Aristóteles, que nasceu por volta de 384 a.C., em grande parte de sua obra, dedicou-se a estudar o movimento dos corpos. Para ele, seria possível classificar o movimento em dois tipos: natural e violento. O movimento natural estaria relacionado com a tendência dos corpos de ocuparem o seu lugar natural no espaço. Nesse sentido, uma pedra se move em direção ao solo, pois é o seu lugar natural; já alguns gases (como a fumaça de uma fogueira, por exemplo) se movem no sentido contrário ao solo porque estão se movendo no sentido do seu lugar natural. O movimento violento seria aquele em que o corpo seria forçado a deixar o seu lugar natural. Outra consideração da Física Aristotélica é que, em queda livre, os corpos com maior massa se moveriam com velocidade maior, e esta, por sua vez, após uma violenta aceleração no instante inicial ao movimento, permaneceria constante ao longo da queda.

As ideias aristotélicas acerca do movimento dos corpos prevaleceram por vários séculos, porém, foram drasticamente modificadas por Galileu Galilei (1564-1642). Entre outras contribuições no estudo do movimento dos corpos, Galileu formulou o princípio da relatividade e o princípio da inércia. No tocante ao princípio da relatividade, para compreendermos a contribuição de Galileu, tomamos dois sistemas de referência,  $S$  e  $S'$ , um em repouso e outro que se move com velocidade constante, respectivamente. Galileu estabeleceu que as mesmas leis físicas devem ser válidas em ambos os sistemas de referência. Em outras palavras, podemos enunciar o que atualmente é conhecido como “princípio da relatividade”, ou seja: as leis da Física devem ser sempre as mesmas para qualquer sistema de referência inercial (isento de aceleração), sem que se possa atribuir nenhum estado de repouso ou movimento absoluto.

### **Atividade 2: Relatividade de Galileu**

Para compreendermos melhor o significado do princípio da relatividade de Galileu, vamos imaginar a seguinte situação: Tomamos novamente os dois sistemas de referência,  $S$  e  $S'$ , onde  $S$  é o leito da estrada e  $S'$  o vagão de um trem que se move com velocidade constante e em linha reta em relação a  $S$  (leito da estrada). Nesse caso, tanto  $S$  como  $S'$  podem ser considerados referenciais inerciais, pois estão isentos de aceleração. Um observador em repouso em relação a  $S'$  lança uma esfera para cima e a apanha novamente em suas mãos. Ao observar a trajetória da esfera, ele percebe que se trata de uma linha reta, como mostra a Figura 2.

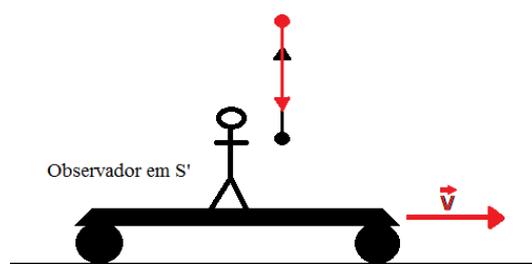


Figura 2: Princípio da relatividade

### Questões:

- 1) Faça um desenho de como um observador no solo, em repouso em relação aos trilhos, veria a trajetória da esfera.
- 2) Se for o observador no solo que lançar a esfera para cima para depois apanhá-la em suas mãos, faça um desenho de como o observador em movimento no trem veria a trajetória da esfera.

O princípio da inércia, na concepção de Galileu, não é exatamente aquele que conhecemos nos dias atuais, que, no caso, cabe a Isaac Newton, que nasceu em 1642, mesmo ano de morte do físico italiano. Na concepção de Galileu, o movimento circular também seria um movimento inercial. Ele considerava que os corpos celestes apresentavam movimentos circulares, pois esse era seu estado perfeito de movimento, ou seja, seu estado natural. Outros corpos se moviam em linha reta, pois necessitavam retornar ao seu local natural pelo caminho mais curto possível. Cabe ressaltar que, por meio dessas considerações, fica evidente que Galileu formulou satisfatoriamente o princípio da relatividade, mas, no que diz respeito ao princípio da inércia, ele chegou muito próximo à concepção atual. Também, observa-se que, mesmo que Galileu as contestasse, ainda existiam algumas concepções aristotélicas em sua obra (CINDRA, 1994).

### 1.3 As transformações de Galileu

As transformações de Galileu consistem em uma análise de como se podem formular as leis da Física para um sistema de coordenadas e, posteriormente, passá-las a

outro sistema. Mais especificamente, Galileu analisou a transformação das coordenadas de um sistema de referência em repouso para outro que efetua um movimento de translação retilíneo e uniforme em relação ao primeiro. As transformações de Galileu consistem no pilar para o princípio da relatividade. Para compreendermos as transformações de Galileu, tomemos dois sistemas de referenciais inerciais S e S', onde S' se desloca com velocidade constante  $v$ , na direção e no sentido indicados na Figura 3.

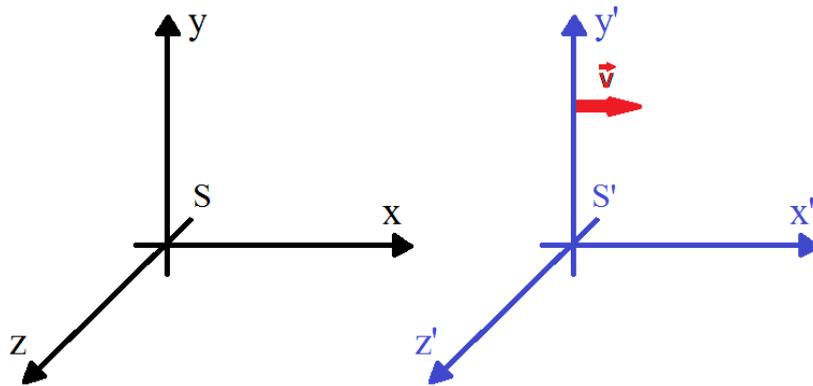


Figura 3: Transformações de Galileu

Tomemos um instante em que  $t = t' = 0$ , onde S e S' coincidem espacialmente, como podemos ver na Figura 4. Nesse instante ocorre um evento no ponto P que pode ser definido pelas coordenadas S ( $x, y, z$  e  $t$ ) e S' ( $x', y', z'$  e  $t'$ ), onde as três primeiras coordenadas de cada referencial correspondem às coordenadas espaciais, e a quarta indica o momento da ocorrência do evento. Como admitimos que no instante  $t = t' = 0$ , quando ocorre o evento, S e S' coincidem, então, temos que:  $x_0 = x_0'$ ,  $y_0 = y_0'$  e  $z_0 = z_0'$  e  $t_0 = t_0'$ , conforme a Figura 4:

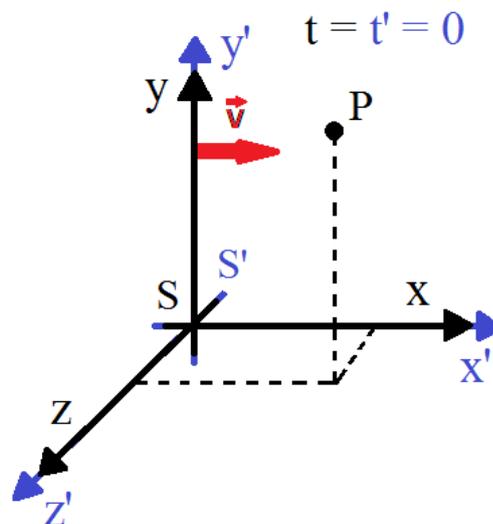
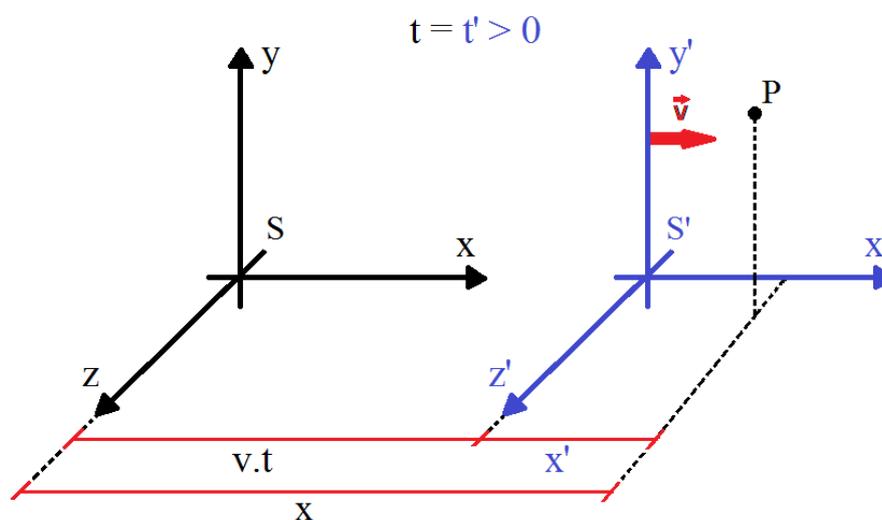


Figura 4: Instante em que S e S' coincidem espacialmente

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

Consideremos, agora, um instante posterior  $t = t' > 0$ , onde o sistema de referência  $S'$  se deslocou uma distância igual a  $v \cdot t$  em relação ao sistema  $S$ , conforme a Figura 5:



**Figura 5: Instante em que S e S' se separam por uma distância igual a  $v \cdot t$**

Nesse caso, podemos relacionar as coordenadas dos dois sistemas de referência da seguinte maneira:

- $x = x' + v \cdot t$ ;
- $y = y'$ ;
- $z = z'$ ;
- $t = t'$ .

As transformações de Galileu consistem no pilar para a formalização do princípio da relatividade (no sentido clássico). Uma consequência desse princípio é o fato de que, para Galileu, seria impossível detectar o movimento em um referencial inercial. Tomamos o seguinte exemplo: imagine que você está no interior de uma caixa fechada (é impossível olhar para o lado de fora). Segundo as considerações de Galileu, seria impossível, por meio de experiências mecânicas em seu interior, detectar se a caixa se encontra em movimento ou em repouso (essa afirmação é válida somente para movimentos isentos de aceleração, ou seja, referenciais inerciais).

Podemos perceber que, nas transformações de Galileu, considera-se  $t = t'$ . Isso significa que, para Galileu, o tempo terá sempre a mesma medida, independentemente do referencial. Desse ponto de vista (ponto de vista galileano), o comprimento também não se altera quando mudamos de referencial. Essas afirmações consistem no fato de que, para

Galileu, o movimento é relativo, porém, o tempo, assim como o espaço, é considerado absoluto. Essa concepção foi igualmente adotada por Newton e perdurou até o início do século XX.

#### 1.4 Newton e a relatividade

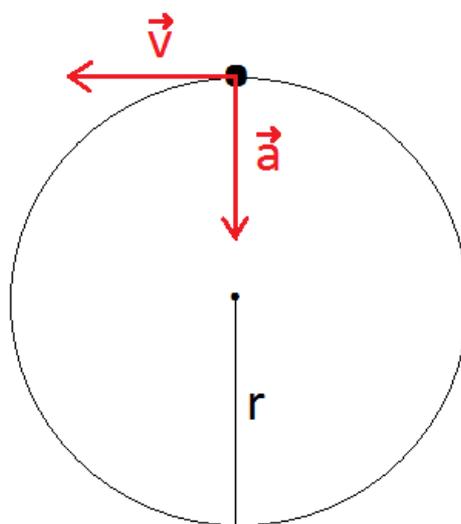
Isaac Newton nasceu na Inglaterra em 1642, mesmo ano da morte de Galileu. Era uma época de grandes modificações no meio científico. Newton se apoiou em conhecimentos deixados por cientistas como: Galileu, Descartes, Euclides e Kepler. Ao longo de vários anos, publicou diversos trabalhos que revolucionaram a Óptica, a Matemática e as leis do movimento.

Em 1687, Newton publicou uma de suas obras mais importantes, *Philosophiae naturalis principia mathematica* (em português, *Princípios matemáticos da filosofia natural*), que ficou conhecida, mais tarde, somente como os *Principia* de Newton. Esse trabalho contém uma descrição acerca da cinemática de Galileu e do movimento planetário de Kepler. Newton apresenta, também, as definições de força, aceleração e ação a distância. Costuma-se dizer que o cerne dos *Principia* são as chamadas “três leis de Newton”, que podem ser enunciadas da seguinte maneira:

- 1ª lei: Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas a ele.
- 2ª lei: A mudança no estado de movimento de um corpo é proporcional à força resultante impressa e inversamente proporcional à massa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime a força.
- 3ª lei: A uma ação sempre se opõe uma reação de mesma intensidade, mesma direção, porém, em sentido contrário.

Não nos preocuparemos aqui com a definição exata das leis de Newton, e sim com o seu significado no que diz respeito ao princípio da relatividade. Com a definição de força e aceleração, Newton formaliza a ideia de referencial inercial. Nesse sentido, um referencial inercial é aquele isento de aceleração. No que diz respeito aos movimentos retilíneos, basta afirmar que um sistema de referência não apresentará aceleração quando nenhuma força estiver atuando sobre ele, ou quando a resultante das forças for igual a

zero. Já um sistema de referência em rotação não pode, de forma alguma, ser considerado um referencial inercial, isso porque, para manter um sistema em rotação, inevitavelmente, é necessária a ação de uma força (força centrípeta), que, conseqüentemente, gera uma aceleração (aceleração centrípeta). Em outras palavras, todo corpo em movimento tende a desenvolver uma trajetória em linha reta. Nesse caso, no movimento circular, o corpo é constantemente forçado a mudar sua trajetória retilínea pela ação da força centrípeta que gera uma aceleração (aceleração centrípeta) direcionada ao centro, mantendo o corpo em movimento circular.



**Figura 6: Representação da ação da aceleração centrípeta**

Newton formalizou o significado de um referencial inercial e estabeleceu as condições para que possa ser considerado como tal. Esse feito auxilia na consolidação do princípio da relatividade, que afirma que “as leis da Física devem ser as mesmas para qualquer sistema de referência inercial”. Nesse sentido, a velocidade, a aceleração, assim como todas as grandezas relacionadas ao estado de movimento de um corpo devem ser verificadas em relação a um sistema de referência inercial. Com isso, Newton descarta a hipótese de um estado de movimento ou de repouso absoluto. O movimento e o repouso são relativos, e essa condição deve ser verificada com base em um referencial inercial.

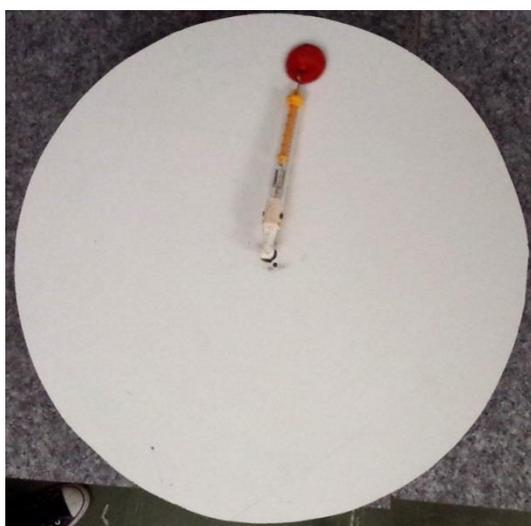
### **Atividade 3: Movimento circular**

Um referencial inercial somente pode ser considerado como tal se for isento de qualquer tipo de aceleração. Essa informação, a princípio, não poderia causar muitos problemas, pois são conhecidas as situações em que essa condição é satisfeita: repouso e movimento retilíneo uniforme (MRU). Portanto, um sistema que se mova em um movimento retilíneo acelerado não pode ser considerado um referencial inercial. Esse movimento é tratado como MRUV para os casos de aceleração constante. E quanto ao movimento circular, ele também é classificado em movimento circular uniforme e movimento circular acelerado. No primeiro, a velocidade angular é constante; já no segundo, ela é variável, ou seja, trata-se de um movimento acelerado. Obviamente que o movimento circular acelerado, ou movimento circular uniformemente variado (MCUV), como é chamado para os casos de aceleração angular constante, não pode ser considerado um referencial inercial.

E no que diz respeito ao MCU, em que a velocidade angular é constante, esse sistema pode ser considerado um referencial inercial? Na verdade, não! Para manter qualquer corpo em um movimento circular (mesmo em um MCU), é necessária a ação de uma força radial direcionada ao centro da circunferência. Essa força é necessária para superar o efeito da inércia do corpo que o faz sempre tender a um movimento retilíneo.

A atividade consiste em uma demonstração da força centrípeta – obviamente, se existe uma força resultante diferente de zero, também deve existir uma aceleração, a aceleração centrípeta. Para efetuar o experimento, utiliza-se um disco de MDF com um furo no centro. Nesse furo, fixa-se um motor elétrico (pode ser qualquer motor de carrinho de brinquedo, de impressora – no caso, o utilizado foi um motor de aspirador de pó manual para carros) e, no eixo do motor, fixa-se um dinamômetro onde é presa uma arruela (Figura 7). Quando o disco começa a girar, o dinamômetro mede uma força, que podemos entender, por aproximação, como sendo a força centrípeta. Devido à velocidade de rotação do sistema, não é possível fazer uma leitura do valor dessa força, porém, ela pode ser evidenciada pelo aumento da distância da arruela em relação ao centro do disco. As Figuras 7 e 8 demonstram dois momentos, respectivamente: o sistema em repouso e o sistema se movendo com velocidade angular aproximadamente constante.

A força resultante indicada no dinamômetro tem como efeito não a mudança da velocidade em módulo, e sim em direção. Ou seja, constantemente, a força centrípeta muda a direção da velocidade (que seria uma linha reta tangencial à circunferência se a força centrípeta deixasse, por algum motivo, de existir). Essa força resultante diferente de zero, obviamente, gera uma aceleração, chamada de “aceleração centrípeta”, que também é radial no sentido do centro da circunferência. Essas características tornam necessário assumir que qualquer sistema em um movimento circular não pode ser considerado um referencial inercial, mesmo que seja em um movimento circular uniforme.



**Figura 7: Dinamômetro em repouso**



**Figura 8: Dinamômetro em movimento**

Assim como para Galileu, para Newton, o movimento deveria ser relativo (Galileu já admitia o movimento relativo, mas foi Newton quem formalizou a ideia de referencial inercial), porém, o tempo e o espaço em que esses eventos ocorriam ainda eram considerados absolutos. Ou seja, tanto para Galileu como para Newton, o tempo e o espaço existiam separadamente dos fenômenos físicos, portanto, eram considerados como uma espécie de palco onde os fenômenos acontecem, não se modificando pela sua ocorrência. Nas palavras do próprio Newton: “o tempo absoluto, verdadeiro, matemático, em si mesmo e pela sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa”; “O espaço absoluto, por sua natureza, sem nenhuma relação com algo externo, permanece sempre semelhante e imóvel” (apud SERWAY, 2004).

Passaram-se mais de duzentos anos até que essas concepções se modificassem. Durante esse período, Newton teve muitos adeptos e alguns críticos. Num panorama mais geral, paralelamente ao desenvolvimento da mecânica, as teorias acerca da eletricidade e

do magnetismo foram evoluindo ao longo dos anos. Na formalização dessas teorias, quando conflitadas com a mecânica newtoniana, é que iria residir o cerne da TRR de Einstein.

**Questões – Item 1.1 a 1.4:**

- 1) Imagine que você esteja sentado em uma poltrona no interior de um ônibus. O ônibus se move com velocidade constante pelas ruas do bairro em que você mora. Sobre essa situação, considere a seguinte afirmação: “Sobre o seu estado de movimento, eu posso dizer que você se encontra tanto em repouso como em movimento.” Essa afirmação pode estar correta? Explique a sua resposta.
- 2) Um ônibus se move em linha reta e com velocidade constante de 35 km/h em relação a uma pista plana e horizontal. Você deseja mudar de lugar e se levanta da sua poltrona caminhando com velocidade constante de 3 km/h em relação ao ônibus para a frente do veículo, ou seja, na mesma direção e no mesmo sentido de seu movimento. Nesse caso, qual será o valor da sua velocidade em relação à pista?
- 3) Utilize o mesmo exemplo da questão anterior (inclusive os mesmos valores em módulo para as respectivas velocidades), mas agora imagine que você se desloca para a parte de trás do ônibus (ou seja, na mesma direção, porém em sentido contrário ao movimento do ônibus). Qual será o valor da sua velocidade em relação à pista?
- 4) Segundo as leis de Newton, quais são as condições para que se possa considerar um referencial como inercial?
- 5) Imagine que você está em pé no corredor de um ônibus. Inicialmente, o ônibus está se movendo com velocidade aproximadamente constante e, de repente, ele dá uma freada brusca. Nesse momento, você sente como se o seu corpo fosse arremessado para frente. Explique por que isso acontece, relacionando a explicação a um princípio físico inerente à Física newtoniana.
- 6) De acordo com a 2ª lei de Newton, se a força resultante que atua sobre um corpo de massa  $m$  aumentar, o valor da aceleração do corpo aumenta, diminui ou permanece constante?
- 7) Suponha que fosse possível obter um valor infinito para a força resultante aplicada a um corpo de massa  $m$ , a que valor iria tender a aceleração desse corpo? Argumente sobre a sua resposta.
- 8) Defina um referencial inercial.

9) Quando se trata da definição do estado de movimento de um corpo, as principais grandezas envolvidas são espaço, tempo e velocidade. Segundo a Física Clássica de Galileu e Newton, quais dessas grandezas são absolutas e quais são relativas? Explique.

### 1.5 A teoria eletromagnética de Maxwell e a natureza da luz

O inglês James Clerk Maxwell (1831 – 1879) foi o primeiro cientista a demonstrar matematicamente a existência das ondas eletromagnéticas. A teoria eletromagnética de Maxwell consiste no último avanço ocorrido no final do século XIX no que diz respeito ao estudo da eletricidade e do magnetismo e da relação entre ambos. A teoria de Maxwell consiste na unificação desses dois campos da Física em uma só teoria.

As primeiras observações dos fenômenos elétricos remetem à Grécia antiga. Thales de Mileto (580 a 546 a.C.), matemático e filósofo grego, percebeu que um pedaço de âmbar (uma pedra de cor amarelada oriunda da fossilização de resinas de árvores), quando atritado a pelos de animais, atraía corpos leves como pedaços de folhas secas. Thales explicou esse fenômeno como sendo o indício de que alguns corpos, como o âmbar, possuem almas que atraem os objetos. Como a palavra “âmbar” tem o mesmo significado que a palavra grega “*eléctron*”, esses fenômenos passaram a ser chamados de “eletricidade”. (SPALDING, 2014)

No que dizem respeito ao magnetismo, as primeiras evidências ocorreram também na antiguidade, porém na Ásia, em uma cidade chamada Magnésia, daí o nome “magnetismo”. Nessa cidade, conhecia-se a força de atração de uma determinada pedra sobre certos materiais. Atualmente, essas pedras formadas de óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) são conhecidas como “magnetitas”.

A princípio, pensava-se que a eletricidade e o magnetismo eram forças da mesma natureza. Com o tempo, entretanto, algumas discrepâncias foram surgindo, por exemplo: o âmbar atraía materiais diferentes dos que eram atraídos pela magnetita e, ao contrário desta, necessitava ser atritado para que a atração pudesse ocorrer. No entanto, por mais que essas duas forças não sejam da mesma natureza, com o tempo, foram surgindo evidências de uma relação entre elas. (SPALDING, 2014)

O primeiro cientista a observar experimentalmente a relação entre eletricidade e magnetismo foi Oersted. Por volta de 1820, ele realizou um experimento colocando um fio condutor retilíneo sobre uma bússola, tendo o fio sido posto paralelo à agulha da

bússola. Quando o fio era percorrido por uma corrente elétrica, a agulha girava, posicionando-se a um ângulo de 90° em relação ao fio. Esse resultado indicou a presença de um campo magnético gerado pelo fio condutor devido à corrente elétrica nele existente. Esse campo magnético gerado pela corrente elétrica que percorria o fio interagia com o campo magnético da agulha da bússola, fazendo-a girar.

Por volta de 1831, Faraday demonstrou que a variação de um campo magnético também poderia gerar uma corrente elétrica. Faraday fez isso ligando uma bateria a uma mola e percebendo que surgia uma corrente em uma outra mola que estava próxima a essa. Esse fenômeno ficou conhecido como “lei da indução”. Restou, então, demonstrado que a corrente elétrica gera um campo magnético e que um campo magnético variável gera uma corrente elétrica.

Maxwell, ao trabalhar nas questões relacionadas à eletricidade e ao magnetismo, elaborou o que ficou conhecido como “a teoria eletromagnética”. De acordo com a teoria de Maxwell, toda variação de um campo elétrico produz um campo magnético variável, e este, por sua vez, produz novamente um campo elétrico, que também é variável e gera novamente um campo magnético, que, por sua natureza, também é variável, e assim por diante. Essas considerações permitiram que Maxwell chegasse à conclusão de que essas consecutivas oscilações de campos elétricos e magnéticos poderiam gerar ondas que se propagam no espaço, e estas ficaram conhecidas como “ondas eletromagnéticas”. Ele demonstrou, além disso, que essas ondas se propagam com uma determinada velocidade, e que esta velocidade era próxima da de propagação da luz, que é de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s no vácuo. Nesse caso, a luz poderia ser interpretada como uma onda eletromagnética.

Por volta de 1887, surgiu no meio científico a primeira confirmação experimental da hipótese de Maxwell de que a luz se tratava de uma onda eletromagnética. O físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), por meio de um circuito oscilante, produziu ondas que podiam ser refletidas, refratadas, difratadas e polarizadas da mesma forma que a luz. Nesse sentido, a teoria eletromagnética unifica as teorias da eletricidade do magnetismo e da óptica em uma só teoria.

Já se sabia anteriormente a Maxwell que a luz apresentava velocidade finita, ou seja, sua velocidade era extremamente alta, porém, tinha um valor limitado. No entanto, foi Maxwell que demonstrou isso com maior formalidade matemática. Também concluiu que a luz poderia ser interpretada como uma onda eletromagnética, hipótese confirmada,

poucos anos após, por Hertz. Essas concepções trariam sérios problemas para a Física teórica do fim do século XIX. A busca por solucionar esses problemas levaria ao que conhecemos hoje como a “teoria da relatividade restrita”. No próximo item, abordaremos alguns desses problemas, a fim de elucidarmos como se deu a origem da TRR.

### **1.6 A aparente incompatibilidade entre a Física de Galileu-Newton e a teoria eletromagnética de Maxwell**

O princípio da relatividade sempre se mostrou uma base sólida para a formulação das leis da natureza. No entanto, surgiram algumas dificuldades após a formulação da teoria da propagação da luz de Maxwell. A luz se desloca a uma velocidade finita, porém muito alta. Esse fato foi observado, pela primeira vez, pelo astrônomo dinamarquês Ole Christensen Roemer, em 1676. Contudo, foi apenas em 1865 que James Clerk Maxwell formulou a teoria eletromagnética, na qual a luz é considerada uma onda eletromagnética que se propaga com uma velocidade constante no vácuo de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s. Ao analisarmos algumas das ideias de Maxwell, conflitanto-as com o princípio da relatividade, percebemos algumas aparentes incompatibilidades entre essas duas teorias.

#### **Atividade 4: Experimento da surfagem no raio de luz**

Utilizaremos aqui uma adaptação do experimento imaginário elaborado pelo próprio Einstein para explorar a incompatibilidade mais fundamental entre a teoria eletromagnética de Maxwell e o princípio da relatividade de Galileu e Newton. Trata-se do experimento de surfagem no raio de luz, que, segundo a maioria dos autores, foi um problema levantado por Einstein ainda quando era muito jovem, anos antes de elaborar a TRR.

Iniciaremos com um problema envolvendo corpos que se movem com velocidades baixas em relação à velocidade da luz, ou seja, situações onde a mecânica clássica é válida com as devidas aproximações. Imaginemos um motociclista perseguindo um ônibus que se move em linha reta e com velocidade constante em relação ao leito da estrada. Em um determinado instante, ele se encontra lado a lado com o ônibus, e ambos se movem com velocidade igual em módulo, direção e sentido. Nesse caso, o motociclista

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

observa o ônibus em repouso, já para um observador em repouso no leito da estrada ambos se encontram em movimento. Essa afirmação está de acordo com o princípio da relatividade de Galileu e pode ser observada facilmente em situações do cotidiano.

Agora vamos tentar aplicar a mesma linha de raciocínio para a teoria eletromagnética de propagação da luz. Imaginemos um feixe de luz se propagando no vácuo, o que, segundo a teoria de Maxwell, se dá com velocidade constante  $c$  (sendo que o valor de  $c$  no vácuo é de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s). Agora imagine que você desenvolve um poder extraordinário de correr muito depressa e decide perseguir o feixe de luz. De fato, você consegue igualar a sua velocidade à velocidade do feixe. Para essa situação, responda às questões abaixo.

### Questões:

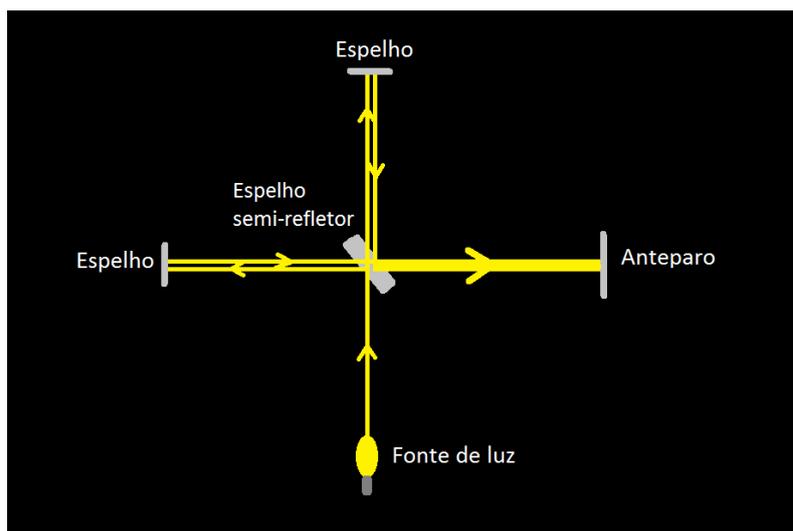
- 1) Nesse experimento, a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s) seria medida em relação a que referencial?
- 2) A partir do instante em que você igualasse a sua velocidade à do feixe de luz, qual seria a velocidade do feixe em relação a você?
- 3) No instante em que a sua velocidade fosse igual à do feixe de luz, como você observaria o feixe?
- 4) Considerando o feixe de luz sob o ponto de vista de uma onda eletromagnética, para o caso em que você se deslocasse com a mesma velocidade que ele, você continuaria vendo um campo elétrico e um campo magnético variável? Explique como você observaria tais campos.
- 5) Discuta sobre a possibilidade física de acontecer o que foi proposto na atividade, ou seja, alguém igualar sua velocidade à de propagação de um feixe luminoso.

Os resultados da atividade proposta (experimento da surfagem no raio de luz) indicam que existe um conflito ou incompatibilidade entre as explicações fornecidas pela teoria eletromagnética de Maxwell e a mecânica clássica (Galileu e Newton) para o mesmo fenômeno. Para solucionar esse conflito, foram sugeridas algumas alternativas ao longo dos anos seguintes. Uma das mais famosas foi a sugestão da existência de uma substância denominada “éter”. Assim como as ondas mecânicas necessitam de um meio para se propagar, as ondas eletromagnéticas não se propagariam no vácuo, e sim em um meio que passou a ser chamado de “éter”. Essa substância estaria presente em todos os

lugares, inclusive no vácuo do espaço “vazio”. A partir desse pressuposto, a velocidade da luz deveria ser medida em relação ao éter e permaneceria fixa em relação a essa substância, porém, diferentes observadores veriam a luz vindo em sua direção a diferentes velocidades. Essa ideia soluciona, de certa forma, o problema da constância da velocidade da luz, mas ainda deixa em aberto o problema da validade do princípio da relatividade, demonstrado no experimento de surfagem no raio de luz.

No final do século XIX, foram realizadas várias experiências com o objetivo de constatar a variação da velocidade da luz. Uma das mais precisas e conclusivas foi a realizada por Albert Michelson e Edward Morley em 1887. O “experimento de Michelson-Morley”, como passou a ser conhecido, teve como objetivo medir a diferença da velocidade da luz em relação ao movimento de rotação da Terra. O raciocínio foi o seguinte: se a teoria do éter é aplicável, então, ao efetuar o seu movimento de rotação, a Terra se movimenta em relação ao éter. Sendo assim, se a luz tem uma velocidade fixa em relação a essa substância, deve haver uma diferença nas medidas da velocidade da luz em relação à Terra, quando estas forem realizadas inicialmente na mesma direção do movimento de rotação do nosso planeta e depois na direção perpendicular.

A Figura 9 mostra uma ilustração do princípio de funcionamento do experimento de Michelson-Morley, o qual consiste em um interferômetro onde a luz emitida por uma fonte coerente é dividida em dois feixes por um espelho parcialmente prateado. Os feixes se deslocam perpendicularmente um ao outro e, quando retornam ao espelho parcialmente prateado, formam novamente um único feixe. Nessas condições, e não havendo diferenças nas velocidades dos feixes, observa-se um padrão de interferência construtivo. Por outro lado, se houvesse diferença na velocidade de um dos feixes, se constataria um padrão de interferência destrutivo. Michelson e Morley efetuaram várias vezes a experiência e em nenhuma delas foi obtido um padrão de interferência destrutivo; era como se a velocidade da luz fosse sempre a mesma, independentemente da velocidade do observador em relação à fonte (MOURÃO, 1997). Os resultados negam a existência do éter.



**Figura 9: Desenho explicativo do princípio de funcionamento do interferômetro de Michelson-Morley**

Nos anos posteriores ao experimento de Michelson-Morley, foram empreendidas várias tentativas para justificar a existência do éter (substância que nunca foi detectada). A mais promissora foi a do físico holandês Hendrik Lorentz. Segundo a sua teoria, com a experiência de Michelson-Morley, é impossível detectar a presença do éter, pois os objetos se contraem e os relógios se desaceleram quando se movem por meio da substância. A teoria de Lorentz afirma que as contrações dos objetos e a dilatação temporal são provocadas pelo movimento relativo ao éter. Ainda de acordo com a sua teoria, seria essa a explicação para um observador medir sempre a mesma velocidade da luz, independentemente de como estivesse se movendo em relação ao éter. De certa forma, Lorentz solucionou o problema do experimento de superfície no raio de luz e da validade do princípio da relatividade. Porém, a sua interpretação sobre o que de fato ocorre com o espaço e o tempo foi embasada em uma discrepância oriunda da existência do éter.

Lorentz permaneceu com a concepção newtoniana de que o espaço e o tempo eram absolutos. Segundo a sua proposta, o fenômeno era explicado por uma consequência da interação dos corpos com o éter. Ou seja, Lorentz chegou muito perto das ideias de tempo e espaço relativos da teoria de Einstein. O que Einstein fez, por sua vez, foi interpretar os fenômenos de uma forma diferente. Embasado na constância da velocidade da luz e no princípio da relatividade, aboliu a necessidade da existência do éter, assumindo tempo e espaço como relativos, ou seja, dependentes do referencial adotado. Cabe ressaltar que Einstein se utilizou amplamente do trabalho de Lorentz em sua teoria.

A teoria de Einstein justifica o resultado do experimento de Michelson-Morley, porém, não é correto afirmar que a sua teoria é consequência do resultado de tal experimento. Einstein elaborou uma teoria baseada em um problema teórico, e não no resultado de um experimento. Ele tinha conhecimento sobre o resultado do experimento de Michelson-Morley, mas esse não foi o fator primordial que o levou à sua teoria.

**Questões – Itens 1.5 e 1.6:**

- 1) Cite e discuta algumas das aparentes incompatibilidades entre a Física newtoniana e a teoria eletromagnética de Maxwell.
- 2) Qual foi a justificativa para a formulação da teoria do éter?
- 3) Qual foi o objetivo e quais foram os resultados do experimento de Michelson-Morley?
- 4) Por que, para solucionar o problema do eletromagnetismo com a mecânica clássica, apenas não se descartou uma dessas teorias?

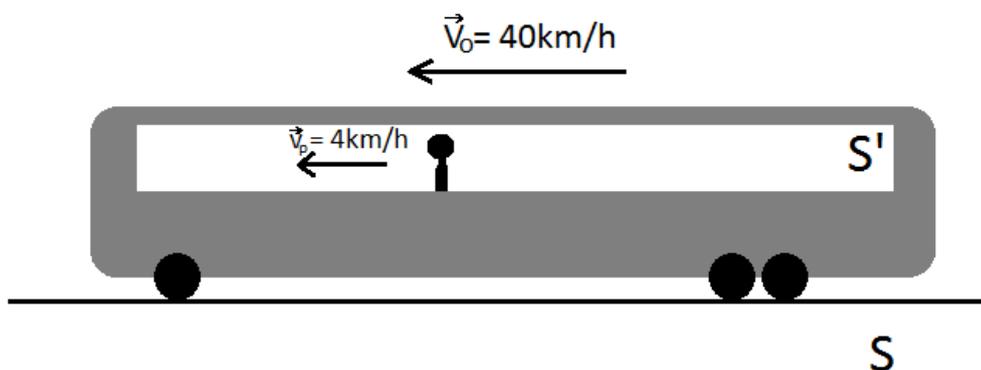
### **1.7 Einstein e a teoria da relatividade restrita**

Albert Einstein era um físico que trabalhava num escritório de patentes em Berna, na Suíça. Em 1905, ele daria um enorme passo rumo a uma nova compreensão do universo e dos fenômenos que nele ocorrem. Em seu artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, Einstein eliminou a necessidade de se assumir a existência do éter e estabeleceu uma nova visão sobre o tempo, o espaço e a matéria. Esse é o primeiro trabalho de Einstein sobre a teoria relatividade. A teoria de 1905 é chamada de teoria da relatividade restrita, pois trata apenas de referenciais inerciais. Nos anos posteriores, Einstein trabalhou na generalização de sua teoria para referenciais não inerciais, o que culminou na teoria da relatividade geral. Neste item, serão discutidos os fundamentos e algumas das consequências da TRR, que é sustentada por dois postulados fundamentais.

O primeiro postulado de Einstein consiste no próprio princípio da relatividade. O que ele fez foi expandir esse princípio para o fenômeno da propagação da luz. O primeiro postulado de Einstein pode ser enunciado da seguinte maneira: as leis da Física devem ser sempre as mesmas para qualquer sistema de referência galileano (inercial), sem que se possa atribuir nenhum estado de repouso ou movimento absoluto. O segundo postulado de Einstein trata da constância da velocidade da luz e pode ser enunciado da seguinte

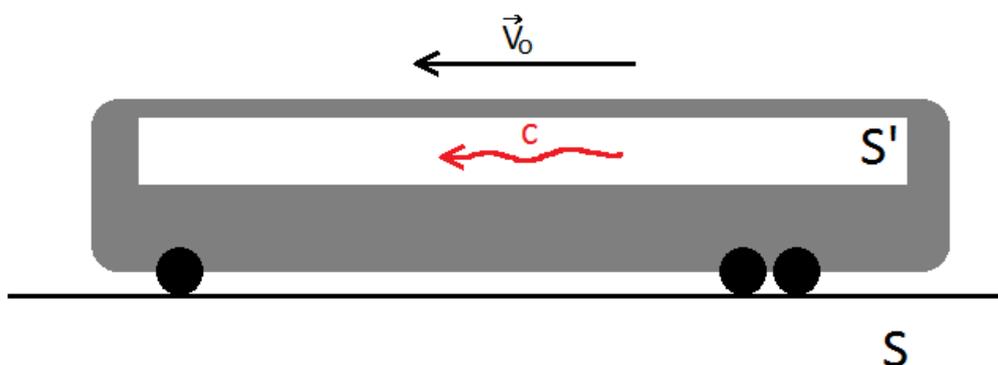
maneira: “[...] a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independentemente do estado de movimento da fonte luminosa” (EINSTEIN, 1958). Com esses dois postulados, Einstein dá o primeiro passo a fim de eliminar o conflito existente entre o princípio da relatividade e a teoria do eletromagnetismo. Ele suprime o conflito assumindo a validade do princípio da relatividade e a constância da velocidade da luz. Assim sendo, no experimento da superfície no raio de luz, seria impossível que uma pessoa igualasse sua velocidade à velocidade da luz. Em outras palavras, independentemente da velocidade com a qual a pessoa se movimenta, em relação a qualquer referencial, ela sempre medirá o mesmo valor para a velocidade da luz.

Para ilustrar as considerações feitas até aqui sobre a TRR, vamos realizar um experimento mental. Nesse experimento, imaginamos um ônibus que se move em linha reta com velocidade constante sobre uma estrada horizontal. Consideremos o leito da estrada como sistema de referência  $S$  e o ônibus como sistema de referência  $S'$ ; ambos podem ser considerados sistemas de referência inerciais. Suponha que o ônibus se desloca com velocidade constante igual a  $V_0 = 40$  km/h em relação à estrada (referencial  $S$ ), e, dentro do ônibus, um passageiro se move com velocidade igual a  $V_p = 4$  km/h em relação ao ônibus (referencial  $S'$ ), na mesma direção e sentido que o veículo. Nesse caso, segundo a mecânica clássica (Galileu e Newton), a velocidade do passageiro em relação a  $S'$  é 4 km/h e em relação a  $S$ , é 44 km/h, como mostra a Figura 10. Isso ocorre porque em relação a  $S$  a sua velocidade se soma à do ônibus. Essa afirmação é válida tanto para o passageiro como para qualquer observador em repouso sobre o leito da estrada (referencial  $S$ ). Ou seja, alguém que estivesse em repouso sobre o leito da estrada também mediria a velocidade do passageiro e chegaria ao valor de 44 km/h. Essas considerações estão de acordo com o princípio da relatividade, o qual afirma que as mesmas leis físicas devem ser formuladas para qualquer referencial inercial.



**Figura 10: Movimento relativo entre ônibus e passageiro**

Agora vamos utilizar como exemplo o mesmo ônibus que se move em relação ao leito da estrada, porém, em vez de um passageiro, um feixe de luz irá se mover em seu interior, e todo o sistema se encontra no vácuo. O feixe de luz se move com velocidade  $c$  (aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s no vácuo) em relação ao ônibus, com mesma direção e sentido do movimento do veículo. Nesse caso, de acordo com o segundo postulando de Einstein, a velocidade do feixe de luz  $c$  terá o mesmo valor em relação ao ônibus e em relação ao leito da estrada (Figura 11). Não importa o quanto o ônibus aumente a sua velocidade, a velocidade  $c$  do feixe luminoso será sempre a mesma para todos os sistemas de referência inerciais.



**Figura 11: Movimento relativo entre ônibus e feixe de luz (ilustrado em vermelho)**

Essas considerações mostram como os dois postulados de Einstein resolvem o problema do eletromagnetismo com a mecânica clássica. Ou seja, para qualquer que seja o referencial, a velocidade da luz terá sempre o mesmo valor  $c$ . Nesse sentido, para qualquer sistema de referência inercial, será formulada a mesma lei física, e a luz terá

sempre uma velocidade determinada, podendo ser considerada como uma onda eletromagnética. Os postulados de Einstein trazem consigo muitas consequências surpreendentes do ponto de vista físico e filosófico. Os próximos itens serão dedicados a discutir algumas delas.

### **1.7.1 A relatividade da simultaneidade**

Na Física Clássica, o tempo e o espaço são considerados absolutos, ou seja, a sua medida será sempre a mesma para qualquer observador, independentemente de sua localização ou de seu estado de movimento. Esse e o próximo item são dedicados a uma análise de como a concepção de tempo se modificou com a ascensão da TRR. Quando se afirma que dois eventos são simultâneos, significa dizer que eles acontecem ao mesmo tempo. Na Física Clássica, todos os observadores concordarão sobre a simultaneidade de um evento, ou seja, se dois eventos forem considerados simultâneos para um determinado observador, também o serão para qualquer outro, independentemente de seu estado de movimento. No âmbito da TRR, essa concepção se modifica de forma bastante dramática, ou seja, nem todos os observadores irão concordar sobre a simultaneidade de um determinado evento. A essa discordância dá-se o nome de “relatividade da simultaneidade”. Segundo a TRR, a noção de simultaneidade depende do estado de movimento do observador. Para compreendermos melhor a noção de simultaneidade e como ela é considerada relativa na TRR, pode-se utilizar o experimento sugerido na sequência.

#### **Atividade 5: Relatividade da simultaneidade**

Para a observação significativa dos fenômenos decorrentes da teoria da relatividade restrita, é necessário que os corpos se movam a velocidades próximas à da luz. Tendo em mente a imensa dificuldade em acelerar corpos até essas velocidades, a atividade foi desenvolvida utilizando ondas sonoras. Nesse sentido, a atividade se trata de uma analogia na qual se emprega um equipamento que pode ser utilizado para o estudo do efeito Doppler para ondas sonoras. Os materiais necessários para a montagem do equipamento são: duas caixas de som (similares às dos computadores de mesa); um

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

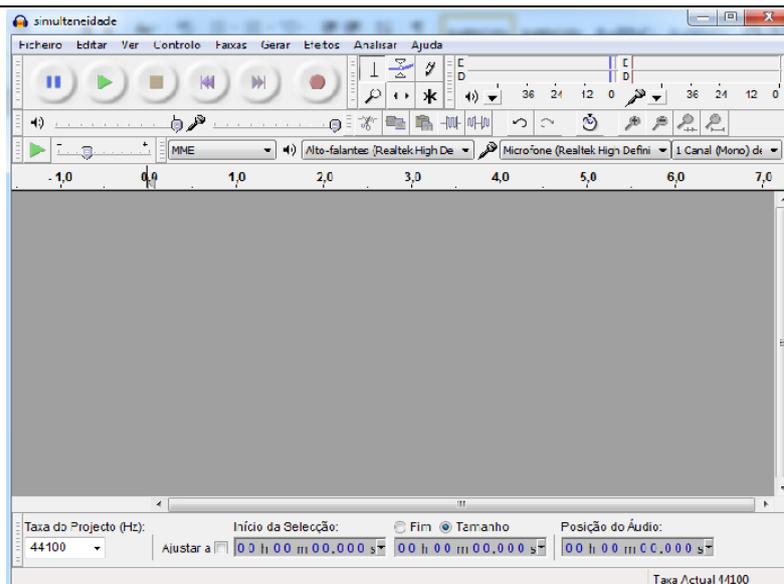
microfone com cabo de aproximadamente 2,0 m e plugue P2 para conectar na entrada de áudio do computador; linha de nylon; dois motores elétricos (desses de carrinho de brinquedo); 6 tubos de caneta Bic e um suporte de madeira com duas hastes distanciadas 2 m uma da outra onde devem ser presas as caixas de som. Nas hastes, foram presos os fios de nylon, onde foram suspensos o microfone e uma das caixas de som. Para movimentar tanto a caixa de som como o microfone, foram utilizados os motores elétricos. A Figura 12 consiste em uma fotografia do equipamento montado e pronto para ser utilizado.



**Figura 12: Fotografia do equipamento utilizado para o estudo da relatividade da simultaneidade**

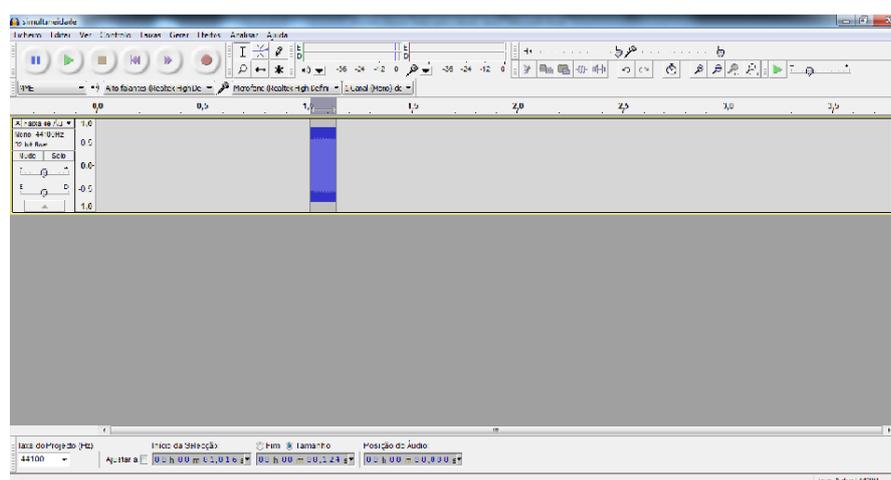
Durante a realização da experiência, as caixas emitem um som que é captado pelo microfone. Para gerar o som emitido pelas caixas, assim como para gravar o som captado pelo microfone, foi utilizado o software Audacity, que é gratuito e possui uma interface simples. A Figura 13 mostra uma imagem da interface do software:

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências



**Figura 13: Interface do software Audacity**

Para a realização da atividade, as caixas de som precisam estar conectadas na saída de áudio do computador, e o microfone, na entrada. A atividade consiste em emitir um sinal sonoro nas caixas e captá-lo no microfone. Inicialmente, deve-se gerar um som, o que pode ser feito no próprio Audacity, clicando na ferramenta “gerar” e depois no ícone “tom”. O som deve durar um curto intervalo de tempo para ser entendido como um sinal apenas. Esse intervalo de tempo deve ser menor do que um segundo. O som gerado, e cujo sinal é mostrado na Figura 14, por exemplo, apresenta uma duração de 0,124 s.

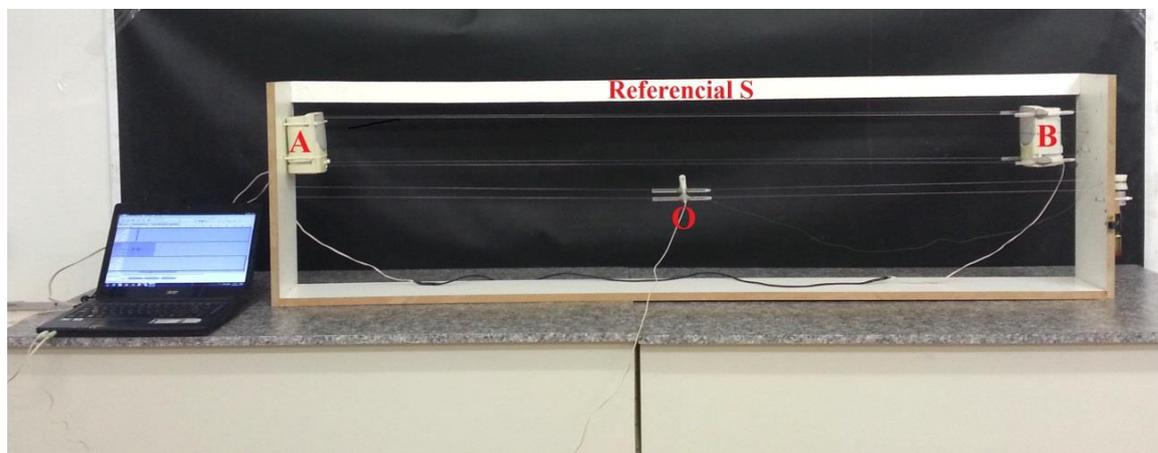


**Figura 14: Sinal gerado pelo software**

Para a melhor realização da experiência, vamos identificar os observadores e os eventos: denominaremos as caixas de som de A e B; a base fixa será o referencial inercial S e o microfone será o observador O. No primeiro momento, A e B ficarão fixas em

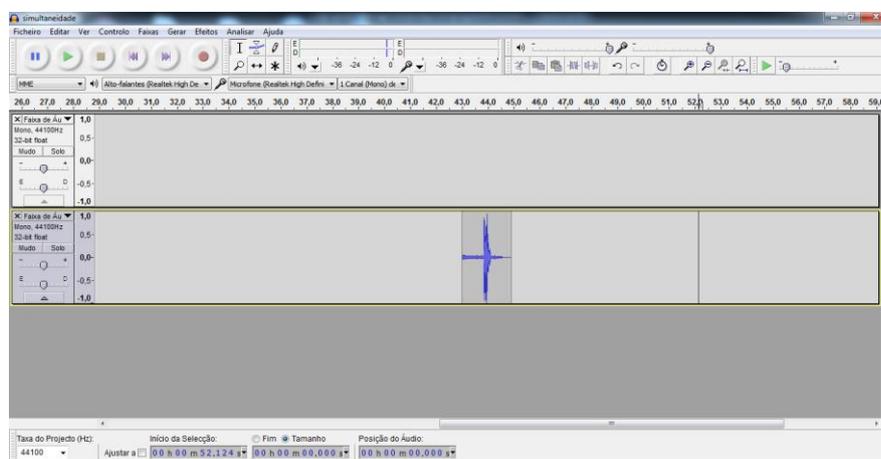
## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

relação a S, e grava-se o som quando o observador O também se encontra em repouso em relação a S no caminho médio entre A e B. A Figura 15 mostra o arranjo experimental montado para essa atividade.



**Figura 15: Arranjo experimental para a análise do sinal quando O se encontra em repouso em relação a S**

A Figura 16 mostra uma imagem do sinal sonoro capturado por O e analisado no Audacity:

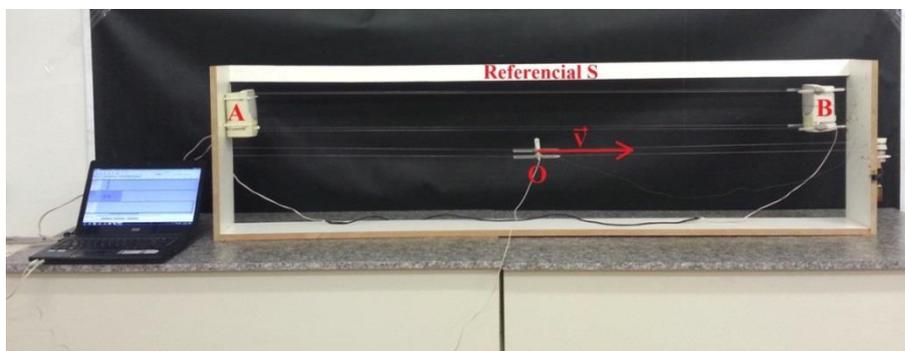


**Figura 16: Sinal gravado pelo software quando O se encontra em repouso em relação a S**

Como mostra a Figura 16, para o observador O, os sinais sonoros se superpõem (observa-se um único sinal); em outras palavras, os sons vindos de A e B chegam até O no mesmo instante. O conclui que os eventos em A e B foram simultâneos. Pode-se chegar a essa conclusão, observando que a gravação é de apenas um som, ou seja, os sons vindos de A e B se confundem em apenas um.

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

A seguir, vamos realizar a mesma gravação, porém, com o observador O em movimento com velocidade  $v$  em relação a S, como mostra a Figura 17.



**Figura 17:** Arranjo experimental para a análise do sinal quando O se encontra em movimento com velocidade  $v$  em relação a S

Agora a gravação vai mostrar que O já não assume os eventos em A e B como sendo simultâneos. Ele afirma isso baseado no fato de que não percebe os sinais no mesmo instante. A Figura 18 mostra como fica a gravação para O em movimento em relação a S.

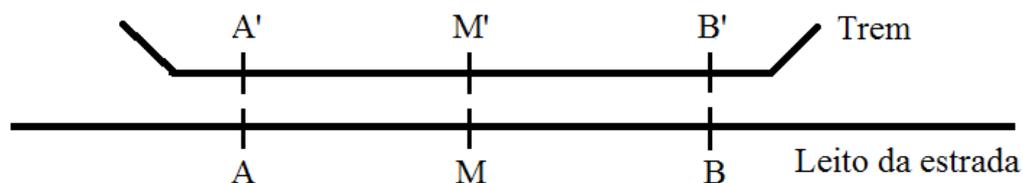


**Figura 18:** Sinal gravado pelo software quando O se encontra em movimento em relação a S

Percebe-se, pela gravação, que para o observador O, o evento em B ocorreu em um instante anterior ao evento em A. Nesse caso, para o observador O, os eventos não são simultâneos. Por meio dessa atividade simples, percebe-se que a simultaneidade depende do estado de movimento relativo do observador. Nesse caso, o mesmo evento foi observado pelo observador O em dois estados de movimento diferentes. Para um dos

estados (repouso relativo), ele assumiu os eventos como sendo simultâneos, já para o outro estado (movimento relativo com velocidade  $v$  em relação a  $S$ ), ele assumiu que os eventos não foram simultâneos.

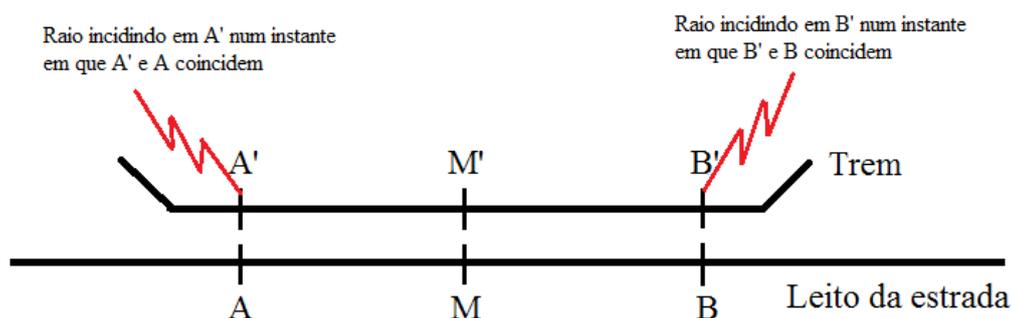
Para demonstrar como se dá a relatividade da simultaneidade no âmbito da TRR, será utilizado um experimento imaginário parecido com o proposto pelo próprio Einstein. Imaginemos dois referenciais inerciais: um é o leito da estrada, o outro é um trem que está inicialmente em repouso em relação ao leito da estrada. No trem, existem três pontos  $A'$ ,  $B'$  e  $M'$ , estando  $A'$  e  $B'$  situados próximos às extremidades do trem e  $M'$  exatamente no centro do trem em relação a um eixo horizontal. No leito da estrada, temos os pontos  $A$ ,  $B$  e  $M$ . No instante  $t=0$  s, mostrado na Figura 19, os pontos são coincidentes com  $A'$ ,  $B'$  e  $M'$ , respectivamente.



**Figura 19: Trem relativístico em repouso em relação ao leito da estrada**

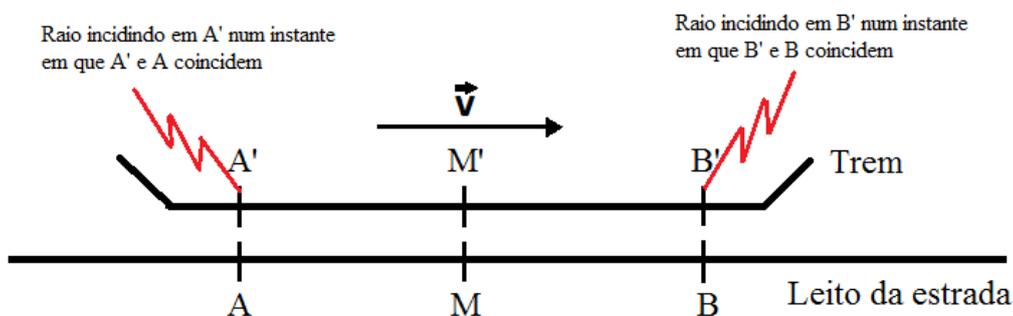
Em um determinado instante, o trem é atingido por dois raios, um em  $A'$  e outro em  $B'$ . A questão reside em definir se esses dois raios foram simultâneos ou não. Iniciaremos com o trem em repouso (Figura 20). No trem, está um observador  $O'$  exatamente no ponto  $M'$ , e no leito da estrada se encontra um observador  $O$  exatamente no ponto  $M$ . Para a análise desse experimento, devemos partir do segundo postulando de Einstein sobre a constância da velocidade da luz; em outras palavras, a velocidade da luz deve ser a mesma para todos os referenciais. Nesse sentido, tanto para  $O$  como para  $O'$ , a luz terá distâncias iguais para percorrer. Como ela irá percorrer essas distâncias com a mesma velocidade, então, ambos os sinais luminosos levarão o mesmo intervalo de tempo para atingirem os respectivos observadores. Essas considerações remetem ao fato de que tanto  $O$  como  $O'$  concordarão sobre a simultaneidade dos eventos (raios) em  $A'$  e  $B'$ .

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências



**Figura 20:** Trem em repouso em relação ao leito da estrada sendo atingido por dois raios

Agora imaginemos que o trem esteja se movendo com velocidade  $V$ , que se aproxima da velocidade da luz  $c$  em relação ao leito da estrada (Figura 21). Em um determinado instante, o trem é atingido por dois raios um em  $A'$  e outro em  $B'$ , da mesma forma que na situação anterior. Por mais que o trem esteja se movendo em relação ao leito da estrada, os raios atingem os pontos  $A'$  e  $B'$  num instante em que estes coincidem com  $A$  e  $B$  respectivamente. Em repouso sobre os pontos  $M$  e  $M'$ , estão os observadores  $O$  e  $O'$  respectivamente.



**Figura 21:** Trem em movimento com velocidade  $v$  próxima a  $c$ , sendo atingido por dois raios

A questão reside novamente em definir se os eventos foram simultâneos ou não. Analisemos inicialmente a situação para o observador  $O$ . Quando os raios atingem os pontos  $A'$  e  $B'$ , dois feixes de luz se propagam na mesma direção e no sentido de  $M$ . Esses feixes de luz consistem na informação da ocorrência do evento. A velocidade da luz é a mesma para os dois feixes, de acordo com o segundo postulando de Einstein. Como a distância que os dois feixes têm a percorrer até o ponto  $M$  também é a mesma, então, é de se supor que, para o observador  $O$  em  $M$ , os dois eventos foram simultâneos (Figura 22).

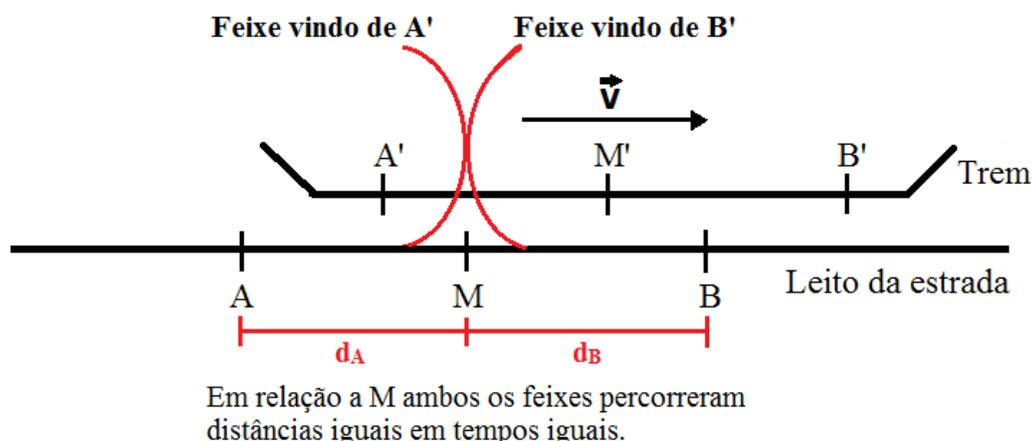


Figura 22: Os dois feixes de luz chegando ao ponto M

Quando o observador O observa o mesmo fenômeno ocorrendo no referencial de  $M'$ , o resultado é um pouco diferente. À medida que os feixes de luz se deslocam para atingir o ponto  $M'$  onde está o observador  $O'$ , o trem se desloca da esquerda para a direita. Isso leva a que o feixe vindo de B tenha uma distância menor para percorrer até  $M'$  do que o feixe oriundo de A' (Figura 23). Como a velocidade da luz é a mesma ( $c$ ) para ambos os feixes, então, o feixe oriundo de B' irá atingir o ponto  $M'$  num intervalo de tempo menor do que o feixe oriundo de A'.

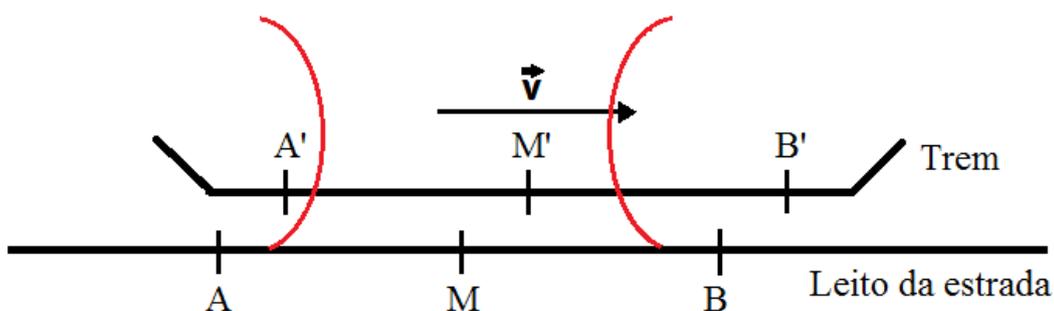
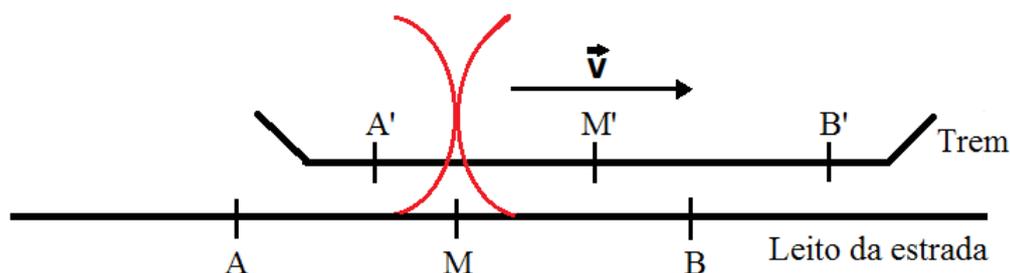


Figura 23: Os dois feixes de luz se propagando enquanto o trem se desloca para a direita

A Figura 24 mostra o evento visto pelo referencial do leito da estrada no instante em que os feixes atingem simultaneamente o ponto M onde está o observador O. Note que nesse mesmo instante o observador O percebe que para  $O'$  o feixe vindo de B' já passou pelo ponto  $M'$ , enquanto o feixe vindo de A' ainda não chegou ao ponto  $M'$ . O observador O em repouso sobre o ponto M, então, conclui que para ele os eventos foram

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

simultâneos, porém, para  $O'$ , o evento em  $B'$  acabou de acontecer, ao passo que a informação do evento em  $A'$  ainda não chegou até  $O'$ .

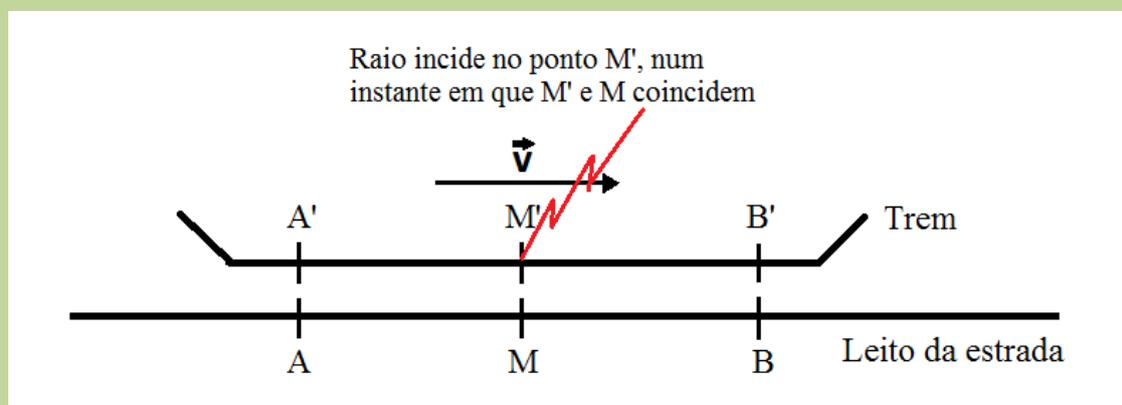


**Figura 24:** Os dois feixes de luz atingem M enquanto que para  $M'$  o feixe oriundo de  $B'$  já passou e o oriundo de  $A'$  ainda nem o atingiu

Porém, o princípio da relatividade aplicado a essa situação traz, ainda, mais uma consequência. Até aqui, analisamos o fenômeno visto pelo observador  $O$  em repouso sobre o ponto  $M$ , mas, se em vez disso, analisarmos o mesmo evento sob o ponto de vista do observador  $O'$  em repouso sobre o ponto  $M'$ , o resultado deverá ser o mesmo, pois, segundo o princípio da relatividade, “as leis físicas devem ser as mesmas para todos os referenciais inerciais”. Como o trem se move com velocidade constante e em linha reta, esse pode ser considerado um referencial inercial, assim como o leito da estrada. Nesse caso, o observador  $O'$  irá ver os fenômenos da mesma forma que  $O$ , ou seja, de acordo com o seu referencial (trem) ele está em repouso, e a distância que a luz terá de percorrer de  $A'$  até  $M'$  e de  $B'$  até  $M'$  é a mesma, portanto, de acordo com seu referencial, ele afirmará que os eventos foram simultâneos. Porém, quando ele observar os eventos ocorrendo para  $O$  em repouso sobre o ponto  $M$ , ele poderá perfeitamente afirmar que é o leito da estrada que está se movendo em relação ao trem, e não o trem que está se movendo sobre o leito da estrada. Essa consideração está de acordo com o princípio da relatividade e tem como consequência que, conforme o seu referencial,  $O'$  afirmará que os eventos foram simultâneos, porém, em relação a  $O$ , ele afirmará que os eventos não foram simultâneos. Qual dos observadores está correto? Na verdade, os dois, pois, segundo a TRR, não existe um referencial privilegiado. Em outras palavras, ambos os observadores estão corretos de acordo com o seu referencial.

**Questões sugeridas para fechamento deste item:**

- 1) O que significa dizer que dois eventos foram simultâneos?
- 2) O que significa dizer que dois eventos não foram simultâneos?
- 3) Com base nas suas respostas para as questões 1 e 2, defina o significado de simultaneidade.
- 4) Segundo a TRR, a simultaneidade é relativa. Discuta que fatores influenciam na definição de simultaneidade no âmbito da TRR.
- 5) A distância entre a Terra e o Sol é de aproximadamente 150 000 000 km, e a luz viaja no vácuo a uma velocidade aproximada de 300 000 km/s. Quando você olha para o Sol, o que você observa na verdade é a luz que foi emitida pela sua superfície, luz esta que precisou viajar dele até a Terra. Nesse caso, se houvesse uma explosão no Sol, você veria essa explosão apenas após a luz ter atingido a Terra e, conseqüentemente, os seus olhos. Isso ocorrendo, quanto tempo levaria desde o acontecimento da explosão na superfície do Sol até o instante em que você a perceberia num referencial terrestre?
- 6) Com base na questão anterior, imagine que uma pessoa em Marte (distância média do Sol: 227 900 000 km) observe a mesma explosão. Em quanto tempo ela perceberia a explosão desde a sua ocorrência na superfície solar?
- 7) Com base nas suas respostas para as questões 5 e 6, você e a pessoa em Marte concordariam sobre a simultaneidade da explosão? Justifique a sua resposta.
- 8) A figura abaixo ilustra a seguinte situação: um trem viaja com velocidade muito próxima à velocidade da luz em relação ao leito da estrada (o trem pode ser considerado um referencial inercial). Num determinado instante, um raio atinge o ponto  $M'$ , e, nesse instante,  $M'$  e  $M$  coincidem. Responda:



- a) Para dois observadores, um em A e outro em B, o evento é simultâneo? Em caso de resposta negativa, qual deles perceberá o acontecimento num instante anterior?

b) Um observador em repouso sobre o ponto M observa o acontecimento em relação a outros dois observadores, um em A' e outro em B'. Nesse caso, o evento será simultâneo em A' e B', de acordo com o observador em M? Em caso de resposta negativa, qual deles perceberá o acontecimento num instante anterior?

### 1.7.2 Dilatação do tempo

#### **Considerações sobre a evolução da concepção de tempo no decorrer da história da ciência**

Desde os primórdios da humanidade, o homem tem observado que alguns fenômenos naturais se repetem de forma periódica. Por exemplo, ele observou que existe um período de luz e um de escuridão no seu dia a dia. Hoje sabemos que esse fato se explica pelo movimento periódico de rotação da terra em torno do seu próprio eixo. O homem antigo deve ter observado que a Lua se apresenta no céu em formatos diferentes. Também constatou que os seus próprios cabelos se tornam brancos e que rugas aparecem no rosto. Todos esses fenômenos têm um denominador comum: eles acontecem com uma determinada rapidez, ou seja, num determinado intervalo de tempo. Atualmente, fenômenos como os mencionados, assim como muitos outros, fazem-nos acreditar que sabemos definir formalmente o conceito de tempo. No entanto, o entendimento mais amplo dessa grandeza não é tão simples, nem de fácil assimilação como pode parecer.

Na busca pelo entendimento dos fenômenos naturais para melhor utilizar os benefícios da natureza para seu bem-estar, parece evidente que, em algum momento da sua evolução, o ser humano deve ter se confrontado com a necessidade de entender e medir o tempo. Até onde se tem registro, os primeiros grupos de seres humanos viviam basicamente da caça, da pesca e da coleta de grãos e frutos presentes na natureza. No entanto, em um determinado momento de seu processo evolutivo, o homem percebeu que podia cultivar algumas plantas a fim de produzir alimento. Esse processo pareceu muito promissor, pois em algumas regiões nem sempre havia recursos naturais suficientes, e o ser humano precisava migrar, colocando muitas vezes o grupo em situações de risco. Nesse sentido, qualquer processo de cultivo (agricultura) que pudesse produzir alimentos se mostrou de fundamental importância. Porém, para a eficácia de tal processo, era necessário saber qual era a melhor época para o plantio e para a colheita desses alimentos.

Outro fator relevante seria o fato de poder armazenar alimento para as épocas de frio, quando os recursos se tornavam muito escassos. Acredita-se que foi assim, nessa época, juntamente com a origem da agricultura, que surgiu a necessidade de estabelecer métodos para medir os intervalos entre o plantio e a colheita. As medidas desses períodos serviriam para que os povos antigos pudessem prever qual seria a melhor época para essas atividades, assim como quanto de alimento armazenar para passar o inverno com segurança. Provavelmente, essas foram as primeiras medidas de intervalos de tempo, e esse processo de medição somente foi possível devido ao desenvolvimento da astronomia, que, até onde se tem registro, foi a primeira ciência desenvolvida pelo ser humano (GRIBBIN, 1979).

Com a evolução do conhecimento da humanidade, os métodos de se medir a passagem do tempo foram se aperfeiçoando. Após os relógios de sol, surgiram os relógios mecânicos e os relógios de pêndulo, seguidos pelos relógios elétricos e eletrônicos, até os precisos relógios atômicos da atualidade. Paralelamente ao desenvolvimento de métodos cada vez mais apurados para as medições dos intervalos de tempo, algumas concepções sobre essa grandeza física também sofreram mudanças no decorrer da história. As mudanças conceituais, possivelmente, foram impulsionadas pela busca de respostas a perguntas como as seguintes: o que o tempo representa? Qual a sua influência no mundo físico? O que significa passado, presente e futuro? Seria possível reverter a passagem do tempo? E até que ponto essas ideias influenciam no cotidiano das pessoas e na forma como elas veem o mundo? Também é possível que esses e outros questionamentos tenham dado origem a várias teorias sobre a natureza e o comportamento dessa grandeza física.

Seria coerente perguntar: o que é o tempo? Santo Agostinho, em suas *Confissões*, faz essa indagação e diz: “Se ninguém me pergunta, eu sei, mas se quiser explicar a quem indaga, já não sei” (2004, p. 268). Posteriormente, faz mais questionamentos sobre a natureza do tempo e o significado dos conceitos de passado, presente e futuro.

Contudo, afirmo com certeza e sei que, se nada passasse, não haveria tempo passado; que se não houvesse os acontecimentos, não haveria tempo futuro; e que se nada existisse agora, não haveria tempo presente. Como podem então existir esses dois tempos, o passado e o futuro, se o passado já não existe e se o futuro ainda não chegou? Quanto ao presente, se continuasse sempre presente e não passasse ao pretérito, não seria tempo, mas eternidade (2004, p. 268).

As afirmações de Agostinho nos conduzem à ideia de que o tempo só existe pela tendência que tem de não existir, ou seja, apenas o presente realmente existe. Santo

Agostinho acreditava que apenas a eternidade do espírito era real e que o tempo não passava de uma distensão do espírito, não tendo nenhum significado na sua ausência. Ao analisarmos a ideia de Agostinho, percebemos que ela se aproxima bastante da concepção moderna de tempo, ou seja, na Física Moderna, o tempo é relativo e não tem significado algum se for desvinculado dos fenômenos físicos. Outro aspecto interessante é que na Física Moderna qualquer medida de um intervalo de tempo sempre irá depender da presença de um observador, ou seja, como nas palavras de Santo Agostinho: “o tempo se trata de uma distensão do espírito e não tem nenhum significado na ausência do mesmo” (HAWKING, 2002).

A distinção entre passado, presente e futuro trata-se de um conceito de fundamental importância para o entendimento da natureza do tempo. O que significa ontem, hoje e amanhã? No cotidiano, um jovem amanhã será adulto e posteriormente um idoso, e essa mudança ocorre sempre nesse sentido, ou seja, um idoso não se tornará adulto e depois jovem, do mesmo modo que ninguém pode ser jovem para sempre. “No século V a.C., Heráclito resumiu essa permanência da mudança com o célebre aforismo: Não nos banhamos duas vezes no mesmo rio” (apud BEN-DOV, 1996, p. 78). Tudo está em contínua mudança, ou seja, o rio mudou, assim como o banhista, em decorrência do tempo passado desde o primeiro banho.

Para Heráclito, as mudanças e o tempo em que elas ocorrem são a própria essência do universo. No entanto, segundo Parmênides, outro filósofo grego, o tempo e a mudança são apenas uma ilusão e o ser verdadeiro é eterno e imutável, o que torna dispensável uma distinção entre passado, presente e futuro, pois ambos são uma mera ilusão (BEN-DOV, 1996). A concepção de Parmênides sobre o tempo é semelhante à de Aristóteles e predominou na mecânica newtoniana.

As leis da mecânica clássica baseadas na mecânica newtoniana definem o tempo como absoluto, ou seja, ele teria sempre a mesma medida para qualquer observador. Os eventos transcorrem em um determinado intervalo de tempo, no entanto, não se faz nenhuma distinção entre passado e futuro; as leis da mecânica newtoniana tanto funcionam se aplicadas em um evento que se desenrola do passado para o futuro, como da forma inversa. Ao realizarmos uma medida de um intervalo de tempo, esta será sempre a mesma, independentemente do estado de movimento ou da localização do observador que a realizou. Essa ideia somente foi revista a partir do começo do século XX, após a publicação da teoria da relatividade restrita de Albert Einstein.

### **A dilatação do tempo no âmbito da TRR**

Uma das consequências mais surpreendentes da TRR é a necessidade de se abandonar a noção de tempo absoluto, ou seja, o tempo que tem sempre a mesma medida em todos os referenciais. Em vez disso, faz-se necessário adotar a concepção de tempo próprio, ou tempo pessoal, o que nos leva à conclusão de que nem sempre todos os observadores concordarão sobre a medida de um intervalo de tempo. A medida de um intervalo de tempo se torna algo local; se passou uma hora para um determinado observador, por exemplo, podem ter passado duas para outro, dependendo do referencial em que o observador realiza a medida. No âmbito da TRR, dois observadores concordarão sobre a medida de um intervalo de tempo apenas se não houver movimento relativo entre eles.

Para formalizar como se dá a diferença na medida de intervalos de tempo (em que acontece um dado evento) efetuada por dois observadores que se encontram em diferentes estados de movimento, utilizaremos a experiência imaginária a seguir. Imaginemos um vagão que se propaga a uma velocidade próxima à da luz em relação aos trilhos de uma ferrovia (é necessário que se imagine que toda a experiência está sendo realizada no vácuo e que tanto o vagão como os trilhos sejam referenciais inerciais). Dentro do vagão, existe uma fonte luminosa na parte inferior e um espelho na parte superior (Figura 25). Um feixe luminoso será emitido da fonte na parte inferior e será refletido na parte superior, voltando para a sua origem. Vejamos a interpretação do fenômeno por parte de um observador situado em um referencial  $S'$  dentro do vagão, em repouso em relação a ele, e a interpretação de outro observador em um referencial  $S$  fora do trem e em repouso em relação aos trilhos (Figura 25).

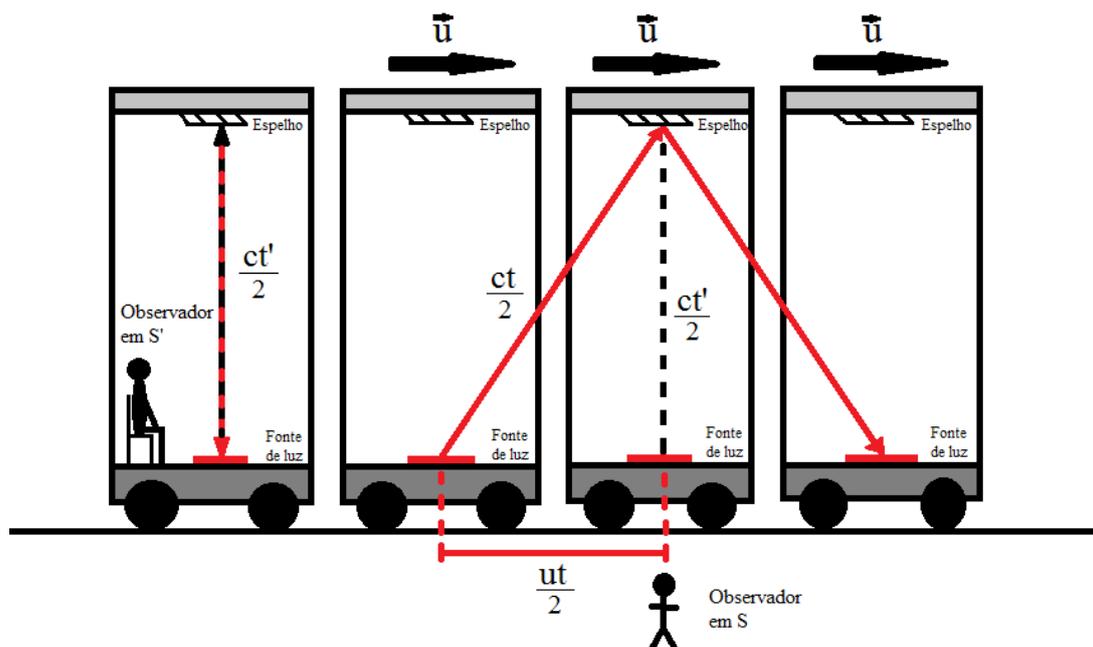


Figura 25: Dilatação do tempo

Na figura anterior,  $u$  é a velocidade do vagão em relação aos trilhos;  $c$  é a velocidade da luz;  $t$  é o tempo medido por um observador em  $S$ ; e  $t'$  é o tempo medido por um observador em  $S'$ . Analisando o fenômeno de ida e volta do feixe luminoso, percebe-se que, para o observador em  $S'$  (interior do trem), a distância percorrida pelo feixe luminoso é:

$$d = \frac{ct'}{2} \quad (1)$$

Afinal, o feixe luminoso para esse observador viaja em linha reta até o espelho, é refletido e volta. Sendo assim, o tempo que o feixe leva para percorrer essa distância é:

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

Porém, o evento visto por um observador em  $S$  precisa de uma outra interpretação. Para esse observador, o vagão está em movimento, e a trajetória do feixe luminoso é diferente (Figura 25). Essa diferença ocorre porque, até o feixe atingir o espelho, o vagão já percorreu uma determinada distância, igual a:

$$d_v = \frac{ut}{2} \quad (3)$$

E até voltar ao chão do vagão, este percorreu novamente essa mesma distância. Nesse caso, com a representação da Figura 26, percebe-se que a distância percorrida pelo feixe luminoso até atingir o espelho pode ser definida por meio do teorema de Pitágoras.

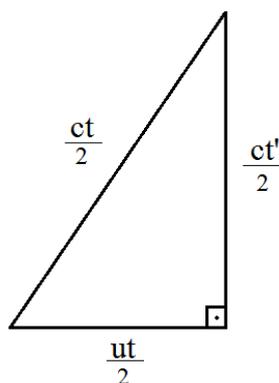


Figura 26: Trajetória do feixe de luz para o observador em S

$$\left(\frac{ct}{2}\right)^2 = \left(\frac{ct'}{2}\right)^2 + \left(\frac{ut}{2}\right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{c^2t^2}{4} = \frac{c^2t'^2}{4} + \frac{u^2t^2}{4} \quad (5)$$

$$c^2t^2 - u^2t^2 = c^2t'^2 \quad (6)$$

- colocando  $t^2$  em evidência, temos:  $t^2(c^2 - u^2) = c^2t'^2$  (7)

- isolando  $t'^2$ , temos:  $t'^2 = \frac{t^2(c^2 - u^2)}{c^2}$  (8)

- que também pode ser escrito da seguinte forma:  $t'^2 = t^2 \frac{c^2}{c^2} - \frac{u^2}{c^2}$  (9)

- do que resulta:  $t'^2 = t^2 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)$  (10)

- isolando  $t^2$ , temos:  $t^2 = \frac{t'^2}{1 - \frac{u^2}{c^2}}$  (11)

- ou ainda:  $t = \sqrt{\frac{t'^2}{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$  (12)

• do que resulta a seguinte relação, que é conhecida como “equação da dilatação temporal”:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (13)$$

Analisando a Equação 13, percebe-se que, para valores muito pequenos de  $u$  em relação a  $c$ , podemos considerar praticamente  $t = t'$ . Temos uma situação que é um caso

especial e pode ser descrito pela Física Clássica. Percebe-se, também, que, à medida que  $u$  cresce e se aproxima de  $c$ , o valor de  $t$  aumenta em relação ao valor de  $t'$ . Em outras palavras, à medida que a velocidade do trem aumenta, o tempo próprio  $t'$  torna-se menor que  $t$ . Esse fenômeno é conhecido como “dilatação temporal”. Outro resultado possível de ser extraído da Equação 13 é que, para que possamos ter valores reais no denominador,  $u$  não pode ser maior que  $c$ . Nesse sentido, a Equação 13 somente é válida para valores de  $u$  menores que  $c$ . Porém, se fosse possível (extrapolando a teoria)  $u$  igualar-se a  $c$ , teríamos  $t$  tendendo ao infinito e  $t'$  a zero. Isso significa que o tempo poderia parar para um observador que viajasse à velocidade igual à da luz (supondo que fosse possível ele viajar a essa velocidade). Outro fato assombroso é que, se alguém pudesse viajar mais rápido do que a luz (novamente extrapolando a teoria), ou seja,  $u > c$ , então, o tempo poderia passar de forma inversa, ou seja, do futuro para o passado, ao invés de passar do passado para o futuro como ocorre em nosso cotidiano. No entanto, é uma consequência da teoria da relatividade de Einstein que nenhum corpo material pode igualar a sua velocidade à da luz e tampouco ultrapassá-la sem que ocorram sérias dificuldades conceituais.

### **O paradoxo dos gêmeos**

Um dos mais famosos experimentos imaginários utilizados para ilustrar o fenômeno da dilatação temporal é conhecido como “paradoxo dos gêmeos”. Nessa situação hipotética, são considerados dois irmãos gêmeos A e B, inicialmente com a mesma idade. Os dois irmãos vivem em uma época em que viagens interplanetárias a velocidades próximas à da luz são comuns. Em um determinado dia de suas férias, o gêmeo A decide fazer uma viagem interplanetária. Ele escolhe uma nave espacial que irá viajar a uma velocidade igual a 99% da velocidade da luz ( $0,99c$ ). No dia do embarque, o seu irmão está na plataforma de lançamento para se despedir. De tão parecidos que os irmãos são, é muito fácil confundir um com o outro. Momentos depois, A embarca, enquanto B volta ao trabalho e aguarda ansioso o retorno do irmão.

Consideraremos que a trajetória da nave, na viagem da Terra até o planeta escolhido, coincide com uma linha reta e que ela se desloca com velocidade constante. Nesse caso, a nave pode ser considerada um referencial inercial. Durante a viagem, ambos os gêmeos (A e B) realizam medidas do tempo transcorrido, e B percebe que o seu tempo está passando mais rápido do que o de seu irmão que está no interior da nave.

Como ele conhece a TRR, fica tranquilo, pois sabe que a velocidades próximas à da luz isso ocorre. Porém, quando A realiza medidas de tempo, percebe o contrário, ou seja, o tempo medido em relação a B, que está na Terra, é que parece estar passando mais devagar.

Depois que o tempo medido por A completa duas semanas, a viagem chega ao fim. No desembarque, B está à espera na plataforma de lançamento. Quando os dois irmãos se reencontram, percebem que B, o irmão que permaneceu na Terra, aparenta estar muito mais velho do que A. Bom, como ambos conhecem a TRR, logo constatarem que isso ocorreu devido ao fenômeno da dilatação temporal. Como o tempo passa mais devagar para observadores que se movem a velocidades próximas à da luz, então, é justificável que B tenha envelhecido mais do que A.

Entretanto, ainda existe um fato a ser analisado. Durante a viagem, enquanto a nave se deslocava com velocidade constante, era impossível que A detectasse, por meio de experiências mecânicas, se era a nave em que ele viajava que estava a se afastar da Terra ou a Terra que estava a se afastar da nave. Consequentemente, durante a viagem, para B o tempo na nave parecia passar de forma mais lenta, porém, para A o tempo na Terra é que parecia passar de forma mais lenta, e ambos não sabiam qual das medidas estava correta. Na verdade, ambos estavam corretos, pois, de acordo com a TRR, não existe um sistema de referência privilegiado, ou seja, as leis da Física devem ser as mesmas para todos os sistemas de referência inerciais. É aí que reside a situação paradoxal que dá nome ao nosso experimento mental.

O paradoxo dos gêmeos só é um paradoxo porque, segundo a teoria da relatividade, nessa situação, tanto o gêmeo viajante quanto seu irmão que ficou na Terra poderiam afirmar que foi o outro quem efetuou o movimento de translação. Sendo assim, o gêmeo da espaçonave poderia dizer que foi a Terra que se movimentou em relação a ele, assim como o gêmeo que permaneceu na Terra poderia dizer que foi a espaçonave que se movimentou, e ele permaneceu em repouso. Como a teoria da relatividade aboliu a ideia de que existe um sistema de referência privilegiado, ambas as afirmações estão corretas. No entanto, não podem existir paradoxos sem solução em uma teoria científica segura, e, ao se analisar a situação, percebe-se que, no momento em que a espaçonave dá a volta para retornar no sentido da Terra, ela muda de sistema de referência. Nesse momento, pode-se constatar que é a espaçonave que se move em relação à Terra, e não o contrário. Logo, esse fato elimina a situação paradoxal (RAY, 1951).

**Questões – Item 1.7.2:**

- 1) Em nosso cotidiano, que fenômenos podemos utilizar para medir intervalos de tempo?
- 2) Suponha que você esteja sozinho dentro de uma caixa totalmente fechada sem interação alguma com o meio externo. A caixa pode ser considerada um referencial inercial, e você não possui nenhum tipo de instrumento ou dispositivo. Nesse caso, é possível dizer que o tempo existe? (Despreze a sua respiração e batimentos cardíacos).
- 3) Conceitue tempo.
- 4) Imagine que exista uma nave espacial que possa viajar até muito próximo da velocidade da luz. Nessas condições, a rapidez com que o tempo passa no interior da nave é maior, menor ou igual em relação a um referencial que se encontra em repouso na superfície da Terra?
- 5) A dilatação do tempo acontece somente quando os objetos se movem com velocidades próximas à da luz. Essa afirmação está correta? Explique a sua resposta.
- 6) Imagine que você vive em um futuro muito distante em que as viagens interplanetárias a velocidades próximas à da luz sejam comuns. Então, no seu aniversário de 18 anos, você decide fazer uma viagem até um sistema planetário distante. No dia da sua partida, você se despede de seu irmão mais velho, que, na ocasião, tem apenas dois anos a mais, ou seja, 20 anos de idade. Após cinco anos, você retorna e se espanta, notando que o seu irmão que permaneceu na Terra aparenta estar muito mais velho. Como conhece a teoria da relatividade restrita, ele explica que isso aconteceu devido ao fenômeno da dilatação temporal. Considerando que a espaçonave viajou a 99% da velocidade da luz, ou seja,  $0,99 c$ , quantos anos o seu irmão estará mais velho do que você no momento do reencontro?
- 7) Um observador em repouso na superfície da Terra (vamos considerar a Terra por aproximação como sendo um referencial inercial) mede um intervalo de tempo igual a 1000 s. Quanto vale, de acordo com a TRR, um intervalo de tempo para um observador que se move em relação à Terra com uma velocidade igual a:
  - a) 72 km/h ou 20 m/s, velocidade de um carro de passeio?
  - b) 1440 km/h ou 400 m/s, velocidade atingida por um avião supersônico?
  - c) 27 000 km/h ou 7500 m/s, velocidade aproximada com que a estação espacial internacional orbita a Terra?
  - d) 99% da velocidade da luz, ou  $0,99 c$ , velocidade atingida por um próton no LHC.

8) De alguma forma, é fisicamente possível realizar viagens no tempo, para o futuro, ou de volta para o passado? Em caso de resposta afirmativa, de que forma você pensa que seja possível fazer isso?

### 1.7.3 Contração das distâncias

De acordo com a mecânica clássica, se um determinado observador realizar a medida do comprimento de um corpo extenso e chegar a um determinado resultado, por exemplo, 5 m, qualquer outro observador que realize a mesma medida, independentemente do seu estado de movimento, concordaria sobre o resultado obtido (com as devidas considerações sobre a precisão e sensibilidade do instrumento de medida utilizado). No âmbito da TRR, a medida do comprimento desse mesmo corpo pode ser discrepante, dependendo do estado de movimento relativo em que o observador efetua a medida. Para introduzir o conceito de contração das distâncias, sugerimos, inicialmente, a realização de uma atividade de caráter lúdico.

#### **Atividade 6: Contração das distâncias**

Para ilustrar em quais das dimensões de um objeto ocorre a contração das distâncias, utilizaremos uma atividade introdutória. A atividade consiste em uma analogia, na qual os estudantes utilizarão um objeto que se move com velocidade extremamente baixa, até mesmo para os padrões não relativísticos. Corta-se um pedaço de madeira ou MDF de aproximadamente 15 cm de comprimento e 4 cm de largura. Em uma de suas extremidades, parafusa-se um gancho com um barbante de aproximadamente 30 cm amarrado. Os estudantes deverão ser desafiados a medir o seu comprimento e a sua largura para dois estados de movimento distintos. Para efetuar as medidas, os estudantes deverão marcar as arestas do objeto em uma folha de papel (A3), como mostra a Figura 27.

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

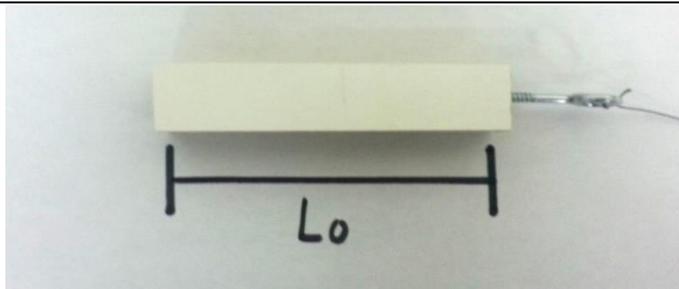


Figura 27: Medindo o tamanho do objeto

A primeira medida será realizada com o corpo em repouso em relação à folha de papel. Em um segundo momento, os estudantes deverão efetuar as mesmas medidas com o corpo em movimento sobre a folha de papel. Para tanto, um dos estudantes deve puxar a madeira, enquanto o outro faz as marcações (sempre quando for marcar a distância paralela ao movimento, deve-se marcar antes na parte da frente e depois na parte de trás do objeto, para que se tenha o resultado esperado, como mostram as Figuras 28 e 29).

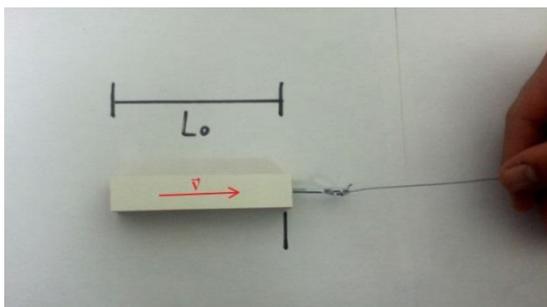


Figura 28: Medindo o tamanho do objeto

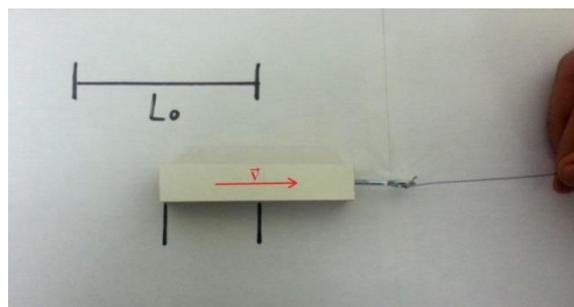


Figura 29: Medindo o tamanho do objeto

A Figura 30 ilustra a diferença entre as medidas para os dois estados de movimento distintos.

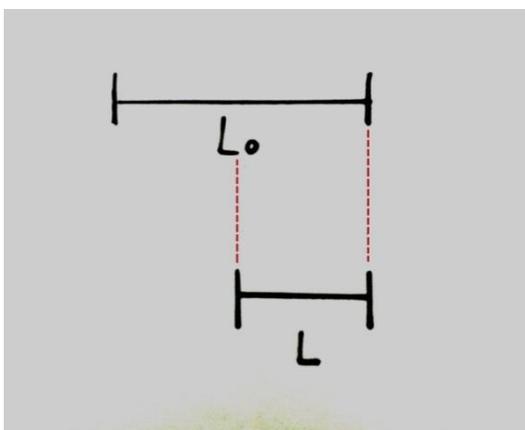


Figura 30: Diferença entre as medidas para os dois estados de movimento

O principal objetivo da atividade é demonstrar que a contração das distâncias ocorre somente na dimensão paralela ao movimento. Também é possível observar que quanto maior for a velocidade relativa do corpo, maior será a diferença entre  $L$  e  $L_0$ .

Evidentemente que a atividade aqui proposta se trata de uma analogia que não deve ser aceita em seus detalhes, porém, pode se mostrar muito eficiente se aplicada de forma coerente e sempre seguida da formalização da teoria sob o ponto de vista relativístico. Uma proposta de como proceder essa formalização será apresentada na sequência do presente texto.

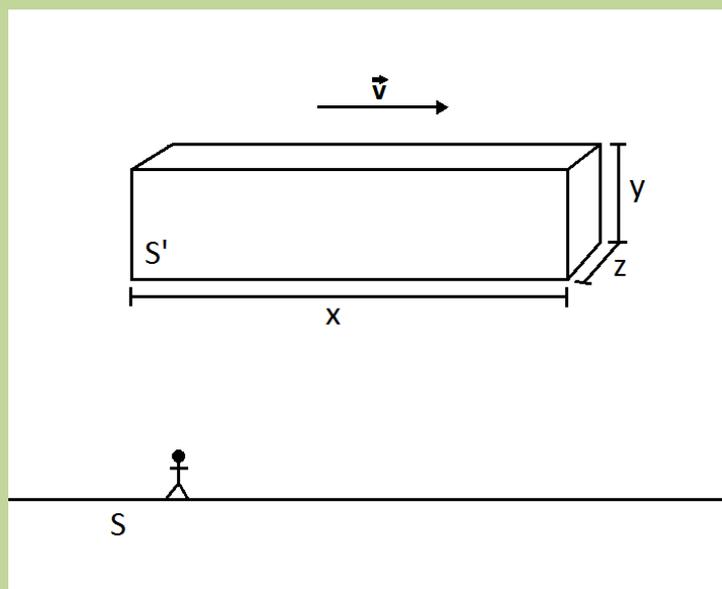
De acordo com a TRR, a medida do comprimento de um determinado objeto depende da velocidade relativa entre o objeto e o observador que efetua a medida. A Equação 14 estabelece a relação entre o valor do comprimento de um objeto medido por um observador em repouso em relação a ele e outro em movimento também em relação a ele.

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (14)$$

Onde  $L_0$  é o comprimento (paralelo ao movimento) do objeto para um observador em repouso em relação a ele,  $L$  é o comprimento (paralelo ao movimento) do objeto para um observador que se move com velocidade  $u$  em relação a ele, e  $c$  é a velocidade da luz. Observando a Equação 14, percebe-se que, quanto mais se aproxima  $u$  da velocidade da luz ( $c$ ), menor é o comprimento  $L$  em relação a  $L_0$ . Se, por acaso, fosse possível  $u$  se igualar a  $c$  (extrapolando a validade da equação), então,  $L$  seria igual a zero. Uma consideração importante é que, quando a velocidade  $u$  é muito baixa em relação a  $c$ , então, o fenômeno da contração das distâncias é praticamente desprezível. Esse é o caso de móveis em nosso cotidiano, como carros, motocicletas, etc. No caso desses corpos, o fenômeno ocorre, mas as proporções são desprezíveis. Outra consideração importante é que o fenômeno da contração das distâncias ocorre somente nas dimensões paralelas à direção do movimento.

**Questões – Item 1.7.3:**

1) O objeto da figura a seguir viaja a uma velocidade constante muito próxima à da luz e pode ser considerado um referencial inercial ( $S'$ ). Um observador em repouso no solo (referencial  $S$ ) observa qual das dimensões do objeto contraídas:  $x$ ,  $y$  ou  $z$ ? Justifique a sua resposta.



2) Imaginemos um disco (referencial  $S'$ ) que gira com velocidade angular constante em relação a uma base fixa (referencial  $S$ ) que pode ser considerada um referencial inercial (sabemos que um disco em movimento circular não pode ser considerado um referencial inercial, porém, o fenômeno da contração das distâncias também ocorre com as devidas considerações). O disco gira com uma velocidade muito próxima à da luz em relação à base. Uma pessoa em repouso em relação a  $S$  decide medir o raio  $R$  do disco e o seu perímetro. Para realizar a tarefa, utiliza uma régua consideravelmente menor do que o raio do disco e passa a fazer as medições. Quando o disco para de girar (fica em repouso em relação a  $S$ , assim como a pessoa que está realizando as medidas), ela mede novamente o raio  $R$  e o perímetro do disco. Sobre as medidas feitas para o disco em movimento e em repouso, assinale a alternativa correta:

- a) As medidas do raio, assim como do perímetro foram as mesmas, tanto para o disco em movimento quanto para o disco em repouso em relação a  $S$ .
- b) As medidas do raio, assim como do perímetro foram maiores para o disco em movimento, se comparadas ao disco em repouso em relação a  $S$ .

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

- c) As medidas do raio, assim como do perímetro foram menores para o disco em movimento, se comparadas ao disco em repouso em relação a S.
- d) A medida do raio foi menor para o disco em movimento, se comparada ao disco em repouso em relação a S, porém, a medida do perímetro permaneceu a mesma para as duas situações.
- e) A medida do perímetro foi menor para o disco em movimento, se comparada ao disco em repouso em relação a S, porém, a medida do raio permaneceu a mesma para as duas situações.
- 3) É correto afirmar que o fenômeno da contração das distâncias ocorre somente com objetos que se movem a velocidades próximas à da luz? Explique a sua resposta.
- 4) A Apollo 11 levou a primeira missão tripulada a pousar na superfície da Lua em 1969. O veículo lançador utilizado na missão foi o Saturno V, que, somado à espaçonave, media aproximadamente 110 m de altura, medida com o foguete em repouso no solo. Imagine que no dia do lançamento uma pessoa em um balão de ar quente situado a uma distância segura do local de lançamento decidisse medir a altura do foguete (ver figura a seguir). Supondo que o balão se encontra em repouso em relação ao solo e a velocidade do foguete no instante da medida é de aproximadamente 2 000 km/h em relação ao balão, qual seria a altura (h) medida pelo balonista?



- 5) Vamos utilizar o mesmo exemplo da questão anterior, porém, agora, vamos imaginar que o foguete Saturno V tivesse sido construído em uma época em que viajar a velocidades próximas à da luz fosse algo comum. Nesse caso, vamos supor que a velocidade do foguete seria de 90% da velocidade da luz, ou seja,  $0,9 c$ . Isso ocorrendo, qual seria a altura medida pelo balonista, de acordo com o seu referencial?

#### 1.7.4 Dinâmica relativística

A dinâmica abrange o estudo de casos onde a velocidade é variável no decorrer do tempo. Isso ocorre quando a força resultante aplicada em um corpo é diferente de zero. Na definição newtoniana, quando a força resultante é diferente de zero, surge uma aceleração diretamente proporcional ao valor da força resultante e inversamente proporcional à massa do corpo, ou seja:

$$a = \frac{FR}{m} \quad (15)$$

Segundo a Física de Newton, à medida que se aumenta a força resultante aplicada no corpo, a aceleração aumenta na mesma proporção, mantendo-se a massa constante independentemente da velocidade que o corpo atinja. Nesse caso, fica subentendido que, segundo a mecânica newtoniana, não existe um limite para a aceleração gerada em um corpo, ou seja, uma força infinita poderia gerar uma aceleração infinita. Porém, de acordo com a TRR, a segunda lei de Newton deve ser modificada, apresentando a seguinte formulação:

$$a = \frac{FR}{m} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2} \quad (16)$$

Ou, ainda, pode-se isolar FR, obtendo o seguinte resultado:

$$F_R = \frac{ma}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \quad (17)$$

Analisando as duas equações (16 e 17), percebe-se que, no âmbito da TRR, à medida que a velocidade  $v$  de um corpo se aproxima de  $c$ , é necessária uma força cada vez maior para gerar uma aceleração menor. Com base nessas considerações, pode-se perceber que, se a velocidade  $v$  fosse igual a  $c$  (extrapolando a validade da equação), então, seria necessária uma força infinita para gerar uma aceleração igual a zero. Essa afirmação é inconsistente, ou seja, é incoerente afirmar que se precise de uma força infinita para gerar uma aceleração igual a zero. Nessas considerações, reside uma das

justificativas para a afirmação de que é impossível acelerar uma partícula com massa de repouso diferente de zero até uma velocidade igual ou superior a  $c$ .

Com a ascensão da TRR, a concepção de massa dentro da dinâmica também sofreu uma severa alteração. De acordo com a mecânica newtoniana, a massa permanece constante, independentemente da velocidade com que o corpo possa se mover. Porém, de acordo com a TRR, à medida que a velocidade de um corpo aumenta, a sua massa também experimenta um aumento. É importante destacar que estamos falando de massa inercial (a massa na interpretação da 2ª lei de Newton), e não de massa no sentido de quantidade de matéria (essa não se altera nesse caso). O aumento da massa de um corpo é dado pela seguinte relação:

$$m_{\text{rel}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (18)$$

Nessa equação,  $m_{\text{rel}}$  representa a massa relativística, ou seja, a massa do corpo quando este se move com velocidade próxima a  $c$ , e  $m_0$  é a massa de repouso, ou seja, a massa do corpo quando está em repouso em relação a um referencial inercial. Analisando a Equação 18, é possível fazer algumas considerações: à medida que  $v$  aumenta em relação a  $c$ ,  $m_{\text{rel}}$  aumenta em relação a  $m_0$ ; se fosse possível  $v$  se igualar a  $c$  (novamente extrapolando a validade da equação), então,  $m_{\text{rel}}$  tenderia ao infinito e  $m_0$  a zero. Nesse caso, fica demonstrada mais uma evidência teórica de que nenhum corpo ou partícula que apresenta massa inercial diferente de zero pode igualar ou ultrapassar a velocidade  $c$ .

### 1.7.5 Energia relativística

#### Atividade 7: Energia mecânica

Uma das consequências da TRR é a equivalência entre massa e energia. Para introduzir essa ideia de uma forma menos abstrata, vamos utilizar como exemplo uma analogia com a energia mecânica. O experimento (que pode ser mental ou concreto) consiste no seguinte: duas bolas aproximadamente esféricas, uma de gude e outra de

boliche, estão penduradas por um fio no teto de uma sala de aula a 1 m de altura do chão, como é ilustrado na Figura 31. Com base nessa situação, responda as questões a seguir.

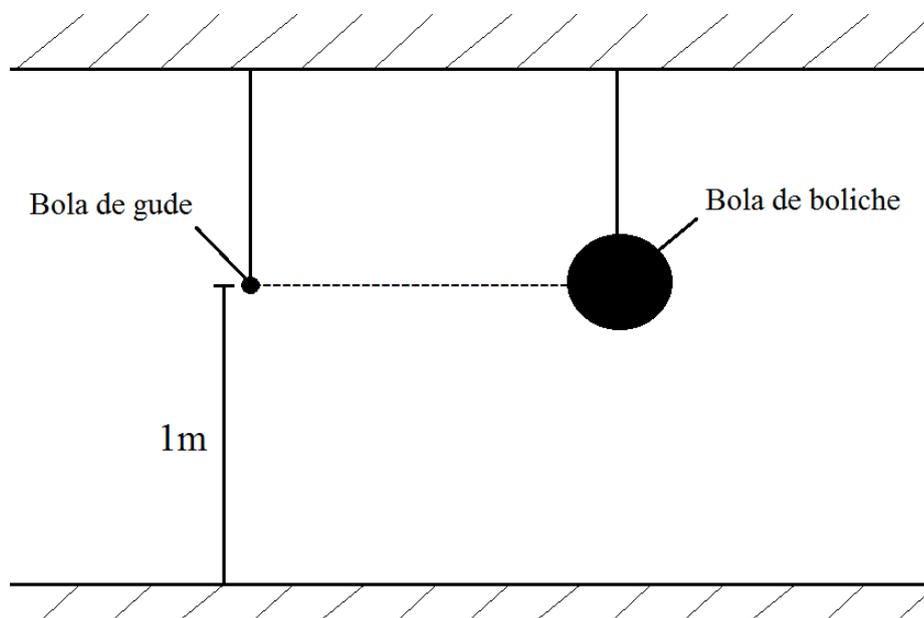


Figura 31: Energia mecânica

**Questões:**

- 1) Na situação ilustrada na figura, as bolas apresentam algum tipo de energia mecânica? Qual?
- 2) Como poderíamos observar a manifestação dessa energia?
- 3) Qual das bolas apresenta um valor maior de energia do tipo citado na questão 1? Por quê?

Deve-se ter clareza de que a atividade aqui proposta consiste em uma analogia, o que nos remete a discutir que uma determinada massa pode manifestar energia, porém, não se trata de uma conversão de massa em energia, como de fato ocorre em uma fissão nuclear, por exemplo. A formalização da equivalência entre massa e energia no âmbito da TRR será feita a seguir.

A TRR modificou profundamente a nossa concepção de tempo e espaço, mas ela também modificou a concepção de energia, relacionando-a intimamente com a massa de um corpo. A TRR postula que a energia de repouso de um corpo material é diretamente

proporcional ao produto da sua massa inercial pela velocidade da luz ao quadrado (Equação 19).

$$E_0 = mc^2 \quad (19)$$

A Equação 19 é, provavelmente, uma das mais famosas da Física e nela reside outra consequência surpreendente da TRR de Einstein. Trata-se da equivalência entre massa e energia. De acordo com a TRR, não existe qualquer distinção entre essas duas grandezas. Nesse tópico, discutiremos o significado dessa equação e a mudança na concepção dessas duas grandezas (massa e energia) decorrentes da teoria de Einstein. Na verdade, a Equação 19 contém a definição da chamada “energia de repouso”, ou seja, a energia que um corpo apresenta devido somente a sua massa. A energia total de um corpo é definida pela Equação 19 apenas quando se considera que o corpo esteja em repouso, ou seja, sem apresentar energia cinética. Conforme a TTR, a energia cinética relativística  $K$  é proporcional à relação dada pela Equação 20:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (20)$$

Nessa equação,  $K$  é a energia cinética do corpo,  $m$  é a massa do corpo,  $c$  a velocidade da luz e  $v$  é a velocidade com que o corpo se move em relação a um referencial inercial. A seguir, analisaremos as consequências da Equação 20. Do ponto de vista da mecânica clássica, ao atribuir ao corpo velocidade  $v = 0$ , o que se espera é que a energia cinética seja igual a zero ( $K = 0$ ). No entanto, de acordo com a equação 20, não é isso que acontece, ou seja, atribuindo  $v = 0$ , o denominador da equação resulta em zero, mas ainda resta o numerador ( $mc^2$ ). Isso resulta em uma contradição lógica, ou seja, um corpo com velocidade zero não pode apresentar energia cinética. Para solucionar o problema, do ponto de vista relativístico, agrega-se mais um termo à equação para subtrair o termo  $mc^2$  já existente. Dessa forma, a equação fica da seguinte maneira:

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 \quad (21)$$

Agora, de acordo com a Equação 21, se a velocidade do corpo for igual a zero ( $v = 0$ ), então, a energia cinética também será igual a zero. Com essa definição para  $K$ , a energia total de um corpo que se movimenta no espaço livre (não existe energia potencial), do ponto de vista relativístico, é dada por:

$$E_T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 + mc^2 \quad (22)$$

Ou seja, a soma da energia cinética com energia de repouso do corpo. Da Equação 22, resulta a equação que define a energia relativística total  $E_T$  do corpo:

$$E_T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (23)$$

### **A bomba atômica**

Em 1905, Einstein elaborou a TRR, e uma das suas consequências foi a mudança na interpretação acerca da massa e da energia de um corpo. A partir de então, essas duas grandezas (massa e energia) passaram a ser tratadas como equivalentes, e essa equivalência está demonstrada na fórmula  $E=mc^2$ . Como a velocidade da luz ( $c$ ) apresenta um valor bastante elevado (aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s), seria possível converter uma massa  $m$  muito pequena de matéria em uma grande quantidade de energia  $E$ . Essa, de fato, é uma possibilidade oriunda da própria TRR de Einstein, porém, permaneceu por alguns anos como uma predição puramente teórica.

Essa possibilidade passou a ser vista como algo plausível na prática após a realização dos primeiros experimentos com urânio. O elemento químico urânio contém uma certa quantidade de isótopos, átomos com o mesmo número de prótons, mas diferentes quantidades de nêutrons. Essa diferente quantidade de nêutrons causa uma instabilidade no núcleo do átomo, provocando a sua possível desintegração. Durante a desintegração nuclear, o átomo pode liberar algumas partículas como elétrons e nêutrons e energia na forma de radiação eletromagnética. Na década de 1930, foram conduzidos por Otto Hanh e Lise Meitner alguns experimentos com o objetivo de bombardear o núcleo do urânio com nêutrons no intuito de criar algum elemento ainda mais pesado. O

que de fato aconteceu foi justamente o contrário, ou seja, surgiram elementos mais leves, com peso de aproximadamente a metade do peso do urânio. Meitner interpretou o fato como se o urânio tivesse se dividido em dois e deu a esse processo o nome de “fissão nuclear”.

Fundamentado nesses experimentos e na teoria de Einstein, em 1939, Niels Bohr publicou um trabalho na revista *Physical Review* descrevendo o mecanismo da fissão nuclear. Um dos primeiros cientistas a levantar a hipótese do desenvolvimento de uma bomba atômica norte-americana foi o húngaro Leo Szilard. Na época, desenrolava-se a 2ª guerra mundial, e Szilard temia que os nazistas pudessem desenvolver uma arma de destruição em massa baseada no processo de fissão nuclear. Diante disso, Szilard procurou Einstein para que contatassem o presidente dos Estados Unidos, que na época era F. D. Roosevelt (1882-1945). Einstein, então, escreveu uma carta ao presidente Roosevelt alertando sobre a possibilidade de construção da bomba por parte dos nazistas, a qual foi enviada em 15 de agosto de 1939. Uma tradução da carta original assinada pelo próprio Einstein se encontra no quadro a seguir.

**F. D. Roosevelt, 2 de agosto de 1939.**

**President of the United States,  
White House  
Washington, D. C.**

Senhor Presidente:

Alguns trabalhos recentes de E. Fermi e L. Szilard, que me foram entregues em manuscritos, levam-me a crer que, em futuro imediato, o elemento urânio pode vir a ser uma nova e importante fonte de energia. Alguns aspectos da situação que se criou parecem exigir atenção e, se necessário, ação rápida por parte da administração. Por conseguinte, acredito ser meu dever conduzir sua atenção para os seguintes fatos e recomendações:

Durante os últimos quatro meses, através dos trabalhos de Joliot na França e Fermi e Szilard na América, tornou-se provável a viabilidade de efetuar uma reação nuclear em cadeia numa grande massa de urânio, em consequência da qual seriam gerados uma vasta quantidade de potência e um grande número de elementos, o radium, por exemplo. Parece quase certo que isso será conseguido em futuro bem próximo.

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

---

Este novo fenômeno levaria também à fabricação de bombas, e é concebível – embora menos certo – que possam ser fabricadas bombas extremamente poderosas de um novo tipo. Uma única dessas bombas, levada por um barco e explodida num porto, poderá perfeitamente destruir o porto inteiro e mais algum território ao redor. Entretanto, tais bombas podem revelar-se demasiadamente pesadas para serem transportadas pelo ar.

Os Estados Unidos possuem jazidas muito pobres em urânio e em quantidades moderadas. Há algumas jazidas boas no Canadá e na Tchecoslováquia e a mais importante fonte de urânio é o Congo Belga.

A vista dessa situação, o Senhor pode pensar que é desejável manter algum contato permanente entre a Administração e o grupo de físicos que trabalham em reações em cadeia na América. Talvez uma maneira possível de se conseguir isto seria o Senhor atribuir esta tarefa a uma pessoa de sua confiança e que pudesse trabalhar de maneira não oficial. Essa tarefa poderia compreender o seguinte:

a) acercar-se dos departamentos governamentais, mantê-los informados sobre o desenvolvimento e estabelecer recomendações para a ação do Governo, dando atenção particular ao problema para assegurar-se do suprimento de minério de urânio para os Estados Unidos;

b) acelerar o trabalho experimental que está sendo realizado no momento dentro dos limites dos recursos de laboratórios de Universidades, fornecer fundos se forem necessários, através de contatos com pessoas desejosas de contribuir para essa causa e, talvez, também obter a cooperação de laboratórios industriais que tenham o equipamento necessário.

Quero crer que a Alemanha tenha realmente cessado a venda de urânio das minas da Tchecoslováquia das quais se apossou.

Talvez possa ser compreendido que ela tivesse tomado esta ação prematura, tendo em vista que o filho do subsecretário de Estado alemão, Von Weizsacker, tem ligações com o Instituto Kaiser-Wilhelm em Berlim, onde alguns dos trabalhos americanos sobre urânio estão sendo divulgados.

Muito sinceramente, seu

Albert Einstein

Tomando conhecimento da possibilidade de os alemães construírem uma bomba atômica, o governo dos Estados Unidos não hesitou e passou a um histórico esforço para

construí-la antes dos nazistas. Para coordenar a construção da bomba, foi chamado um eminente físico da época, J. Robert Oppenheimer, dono de amplo conhecimento dos avanços da ciência de então, assim como dos cientistas que os desenvolviam. Sem dúvida, parecia ser o nome mais indicado para coordenar um projeto de tamanha magnitude. O projeto passou a ser conhecido como “Projeto Manhattan”. Oppenheimer decidiu que todo o processo de fabricação, assim como de testes da bomba deveria ser feito em um mesmo local: no estado do Novo México, a 56 km de Santa Fé, em uma antiga Escola indígena chamada Los Alamos. O lugar ficava a quilômetros de qualquer tipo de habitação.

Em pouco tempo, o local recebeu aproximadamente 3 mil operários que construíram a estrada que ligaria Los Alamos ao resto do mundo. O lugar logo se tornou uma concentração de indústrias, barracas militares e alojamentos metálicos, transformando-se numa espécie de cidade com capacidade aproximada de abrigar 3000 pessoas. Para trabalhar na invenção da bomba, além de operários, foram recrutados, por Oppenheimer, as mais brilhantes mentes científicas da época, exceto Einstein, que, por incrível que pareça, ficou de fora de todo o processo. Entre as mentes reunidas em Los Alamos, estavam vários cientistas renomados e ganhadores do prêmio Nobel, como Fermi, von Neumann e Richard Feynman.

No processo de fissão nuclear, o urânio se divide em dois núcleos mais leves e libera dois nêutrons. Para que a reação seja eficaz, é preciso que esses nêutrons colidam com outros núcleos e assim por diante, provocando o que é conhecido como “reação em cadeia”. O problema é que quando a fissão se inicia grande parte dos nêutrons é muito rápida, não permitindo que a reação em cadeia ocorra de forma eficaz. Em 1942, Enrico Fermi realizou a primeira reação nuclear controlada da história no reator nuclear da Universidade de Chicago construído em uma quadra de *squash*. Fermi conseguiu uma reação em cadeia de forma controlada inserindo no reator um moderador, o Grafite. O Grafite diminui a velocidade dos nêutrons que são lançados no momento da fissão, sustentando, assim, a reação em cadeia.

O problema enfrentado pelos cientistas em Los Alamos era justamente o contrário. Ou seja, para que uma bomba seja eficiente, é necessário que a energia seja liberada rapidamente. Então, como sustentar uma reação em cadeia que ocorra num intervalo de tempo muito pequeno de forma eficiente? Foram seis anos de esforços desde o início do

Projeto Manhattan até a explosão da primeira bomba atômica sobre a cidade de Hiroshima.

Em termos simples, para a bomba funcionar mantendo a reação em cadeia num curto intervalo de tempo, era necessário concentrar uma grande massa de urânio num espaço muito pequeno. Dessa forma, os nêutrons rápidos iriam colidir inevitavelmente com núcleos próximos, devido à concentração elevada de átomos. A primeira tentativa foi lançar uma massa de urânio contra outra com uma espécie de detonador revólver, como mostra a Figura 32. Esse modelo foi chamado pelos cientistas de “*Little Boy*”. O problema é que quando o projétil de urânio era lançado sobre a segunda massa de urânio, antes que as duas massas se incorporassem, o processo de fissão já se iniciava, provocando uma reação prematura, e, conseqüentemente, a reação em cadeia deixava de ocorrer no resto do material.

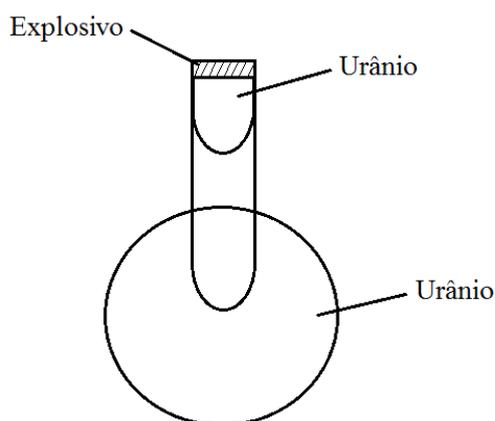


Figura 32: 1ª versão da *Little Boy*

Uma solução para esse problema foi dada pelo membro do grupo de artilharia Seth Neddermeyer. A proposta consistia em, em vez de reunir duas massas de urânio, usar apenas uma e comprimi-la de tal forma a sustentar a reação em cadeia. A ideia era utilizar um cano metálico cheio de urânio inserido em outro cano de diâmetro maior contendo explosivo, como mostra a Figura 33. Essa ideia acabou gerando outro problema: era preciso uma implosão uniforme do cano para a reação em cadeia ser eficaz, ou seja, todas as partes do cano contendo o urânio deveriam ser amassadas exatamente da mesma forma. Em 1943, foram realizadas explosões diárias (do protótipo da bomba, mas sem conter o urânio em seu interior) para testar a ideia da implosão do urânio e averiguar se a implosão seria de fato uniforme como era necessário que fosse. Por mais que a equipe de

Neddermeyer regulasse a explosão, o cano no interior sempre terminava retorcido, o que indicava que a implosão não havia sido uniforme.

As forças de implosão concentram o urânio em um volume pequeno o suficiente para manter a reação em cadeia

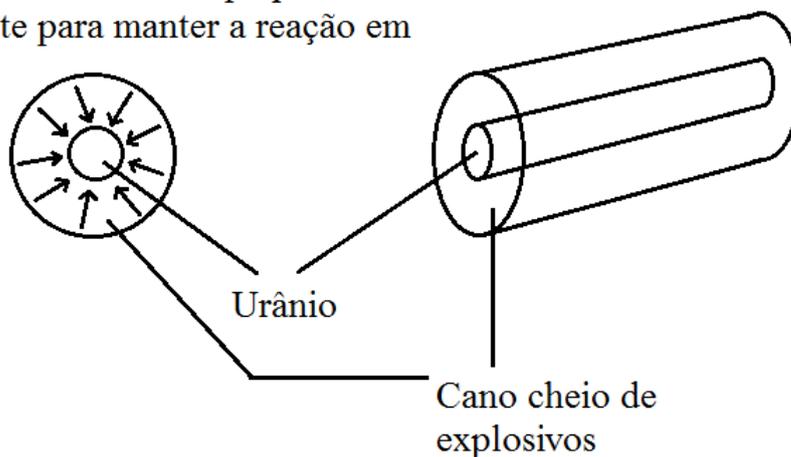


Figura 33: 1ª versão de bomba de implosão de urânio

Quem apresentou uma solução para o problema foram Richard Feynman e von Neumann. Eles perceberam que, quando uma onda de choque passava pelo material, ficavam algumas ondas de pressão que não podiam ser previstas de forma satisfatória. Esses seriam os primeiros passos da teoria do caos. Baseado nessa imprevisibilidade, eles propuseram que os explosivos em torno do urânio deveriam ser dispostos em forma de cunhas para concentrar a onda de choque de forma mais precisa ao colidir com o urânio na parte central. As cunhas seriam detonadas ao mesmo tempo e dentro delas deveria haver uma mistura de explosivos rápidos e lentos. O combustível lento serviria para garantir que o impacto se espalhasse uniformemente sobre o centro da bomba e para adaptar a forma da onda de choque ao formato da superfície do núcleo onde estava o material físsil. A Figura 34 mostra o esquema de cunhas para a implosão do material físsil.

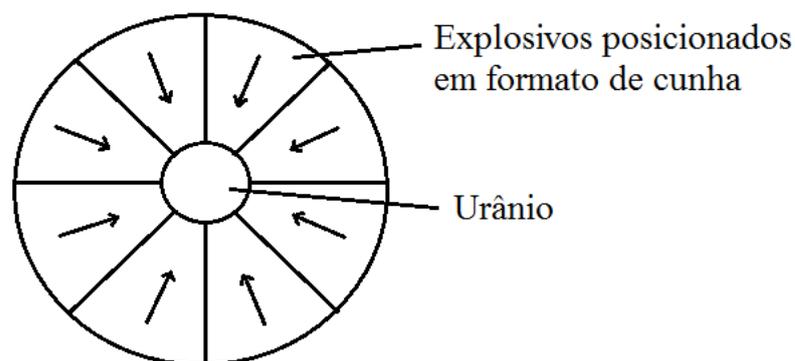


Figura 34: Sistema de cunhas

No dia 06 de julho de 1945, foi testada a primeira bomba atômica de plutônio. A explosão foi realizada a 200 km de Albuquerque no deserto do Novo México. A bomba foi colocada no topo de uma torre de aço de 300 m de altura, e, a 9 km desta torre, Oppenheimer e um grupo de especialistas observariam a explosão do interior de um bunker. Nos instantes que antecederam a aurora, por volta das 5h30min, a escuridão foi rompida por um intenso e ofuscante clarão, seguido de uma onda de calor. O bunker em que estavam Oppenheimer e sua equipe em poucos instantes foi atingido pela onda de choque que estremecia o chão e ecoava pelo vale desértico. Em seguida, formou-se uma imponente bola de fogo em forma de cogumelo que subiu por volta de 12 km de altura. A torre de aço de 300 m de altura evaporou com a explosão, e a areia do deserto virou vidro num raio de aproximadamente 700 m.

A partir desse momento, deu-se início à era nuclear, e, com ela, surgiram várias preocupações. Era a primeira vez na história que a humanidade teria a capacidade de se autodestruir de uma forma tão rápida. Na data do teste no deserto do Novo México, a Alemanha já havia se rendido, porém, agora o inimigo era o Japão. No dia 06 de agosto de 1945, exatamente um mês após o primeiro teste da bomba, foi lançada a *Little Boy* (uma bomba de urânio) sobre a cidade japonesa de Hiroshima, matando 66 mil pessoas e deixando 69 mil feridos. Três dias depois, foi lançada a *Fat Man* (uma bomba de plutônio) sobre a cidade de Nagasaki. No dia seguinte, o Japão se rendeu frente à nova ameaça nuclear.

Mesmo antes da detonação das primeiras bombas no Japão, surgiram recomendações e iniciativas de vários cientistas no que diz respeito ao controle das armas nucleares. O próprio Einstein afirmou que a sua carta ao presidente Roosevelt não tinha

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

---

como intuito o incentivo ao uso do armamento nuclear, e sim compartilhar o receio de que os nazistas pudessem utilizá-lo. Do mesmo modo, Bohr recomendou, ainda antes da explosão da bomba, que se discutisse na comunidade internacional algum meio de se fazer o controle sobre a produção e o uso desse tipo de arma. Porém, como a época era de tensão em todas as nações do mundo, tais recomendações foram imediatamente ignoradas. Em poucos anos, várias nações do mundo desenvolveram suas pesquisas em energia nuclear e na produção de armas nucleares, inclusive o Brasil, que, na década de 1980, também entrou nesse rol.

### **Questões – Itens 1.7.4 e 1.7.5:**

- 1) Baseado na dinâmica relativística, explique por que é impossível acelerar um corpo que apresenta massa inercial diferente de zero a uma velocidade igual à da luz.
- 2) Qual a principal característica relacionada à massa inercial de um corpo que se diferencia entre a Física de Newton e a TRR de Einstein?
- 3) Qual é o significado físico da equação  $E = mc^2$ ?
- 4) A bomba atômica foi uma arma construída com base em qual lei física?
- 5) Explique por que para o funcionamento eficaz da bomba atômica a massa de material físsil precisa ser implodida.

## 2 TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

A teoria da relatividade restrita é assim chamada porque trata de casos restritos em que os corpos não apresentam aceleração, ou seja, trata de referenciais inerciais. Logo após a publicação da TRR, Einstein começou a trabalhar na generalização da sua teoria para sistemas acelerados. Como um campo gravitacional corresponde a um campo de aceleração, a sua nova teoria se tornaria uma nova interpretação do efeito gravitacional.

Após vários anos de pesquisas e muitas tentativas, em 1915, Einstein publica o trabalho que formalizou a generalização da teoria da relatividade. Essa teoria passou a ser conhecida como “teoria da relatividade geral”. Neste capítulo, discutiremos alguns tópicos referentes a ela, assim como as suas consequências no que diz respeito à nossa visão de espaço, tempo e universo.

Einstein observou que existem aspectos incompatíveis entre a TRR e a teoria da gravitação de Newton. Uma incompatibilidade evidente é que esta última explica o fenômeno gravitacional como sendo uma força que age a distância e que qualquer alteração na configuração dessa força seria sentida simultaneamente em todas as partes do universo. Essa ideia entra em contradição com a TRR, que mostra ser impossível que todos os observadores no universo concordem sobre a simultaneidade de um evento.

Einstein se dedicou, durante alguns anos, a estudar o problema da gravidade, até publicar seu trabalho, que mudaria para sempre a ideia que se tinha sobre o universo. O princípio fundamental do qual Einstein deduziu toda a TRG é chamado de “princípio da equivalência” e trata da equivalência entre massa inercial e gravitacional.

### 2.1 O princípio da equivalência

O princípio da equivalência foi utilizado por Einstein como ponto de partida para a dedução da TRG. Esse princípio é derivado da própria teoria newtoniana, porém, foi Einstein quem lhe deu um sentido mais amplo. O princípio da equivalência estabelece a relação entre um sistema acelerado e um campo gravitacional. Por meio dele, fica estabelecida a impossibilidade de um observador afirmar se está se movendo com aceleração constante no espaço livre, sem a ação de qualquer campo gravitacional, ou se está em repouso sob a ação de um campo gravitacional uniforme. Para compreendermos

melhor essa ideia, sugerimos partir de um experimento imaginário que ilustra esse princípio.

### Atividade 8: Experimento do elevador

Imagine um observador que se encontra flutuando no espaço dentro de um elevador, livre da ação de qualquer força, inclusive de efeitos gravitacionais. Ele está flutuando sem tocar em nenhuma das laterais do elevador e sem ter qualquer distinção entre chão e teto. De repente, o elevador começa a se mover com uma aceleração constante igual, em módulo, à aceleração terrestre, como ilustra a Figura 35.

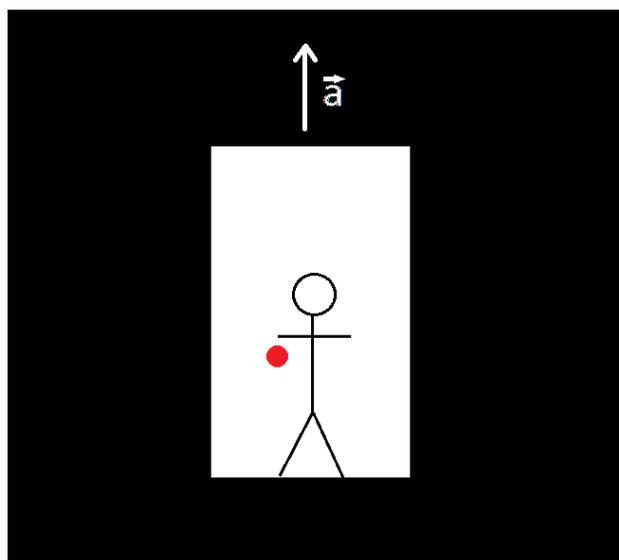


Figura 35: Elevador acelerando no espaço “vazio”

#### Questões:

- 1) Se o observador abandonar um objeto, como mostra a figura, para o seu referencial, qual será o sentido do seu movimento?
- 2) Como o observador poderia afirmar que se encontra em movimento no espaço, e não em repouso na superfície terrestre?

Agora imagine o mesmo observador dentro do elevador, porém, este se encontra em repouso no campo gravitacional terrestre, onde a aceleração é a mesma, em módulo, que a da situação anterior, como ilustra a Figura 36.

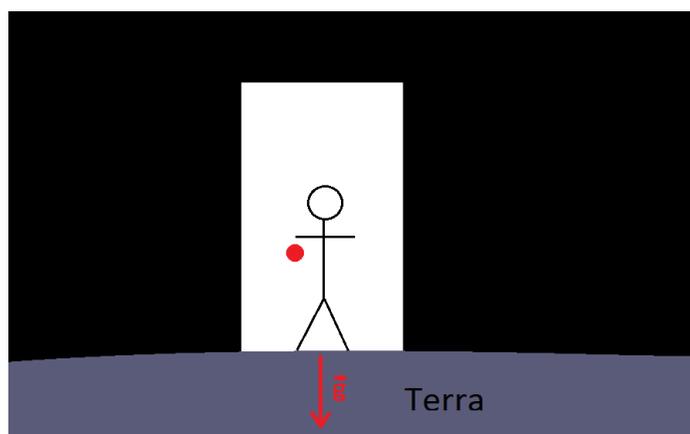


Figura 36: Acelerador em repouso na superfície terrestre

### Questões:

- 1) Se o observador abandonar um objeto, como mostra a figura, de acordo com o seu referencial, qual será o sentido do seu movimento?
- 2) Como o observador poderia afirmar que se encontra em repouso na superfície terrestre, e não se movimentando no espaço, como na situação anterior?

Para uma definição mais formal, pode-se demonstrar matematicamente o princípio da equivalência utilizando-se a Física newtoniana: imaginemos uma pedra de massa  $m_i$  (massa inercial). Segundo a teoria newtoniana, se aplicarmos uma força  $F$  na pedra, surgirá uma aceleração  $a$ , dada por:

$$a = \frac{F}{m_i} \quad (24)$$

Ainda segundo a teoria newtoniana, se abandonarmos a mesma pedra em um campo gravitacional, ela também sentirá uma força que, por sua vez, gerará uma aceleração. Imaginemos por simplicidade que a pedra seja abandonada no campo gravitacional da Terra. Nesse caso, chegamos à ideia de Newton de uma força que age a distância.

$$F = G \frac{M_g m_g}{R^2} \quad (25)$$

Onde  $F$  é o módulo da força que atua sobre o corpo,  $G$  é a constante gravitacional de Newton ( $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{s}^2 \text{ kg}$ ),  $M_g$  é a massa gravitacional da Terra,  $m_g$  é a massa gravitacional da pedra e  $R$  é a distância entre os centros de massa da Terra e da pedra. Se supusermos que a pedra cai no vácuo, tendo somente a gravidade da Terra atuando sobre ela, então, temos que a força que age sobre a pedra pode ser considerada a força gravitacional e a aceleração é a própria aceleração da gravidade. Então, substituindo a Equação 24 na 25, e com as devidas considerações, temos que:

$$G \frac{M_g m_g}{R^2} = m_i g \quad (26)$$

Como:

$$g = G \frac{M_g}{R^2} \quad (27)$$

Substituindo a Equação 27 na 26, temos que:

$$G \frac{M_g m_g}{R^2} = m_i G \frac{M_g}{R^2}. \quad (28)$$

Como resultado:

$$m_g = m_i \quad (29)$$

Analisando essas considerações, é necessário que se admita a equivalência entre a massa inercial ( $m_i$ ) e a massa gravitacional ( $m_g$ ) de um corpo. Se essa afirmação não fosse verdadeira, corpos com diferentes massas inerciais cairiam com diferentes acelerações em um mesmo campo gravitacional, o que de fato não é observado, ou seja, mesmo do ponto de vista da Física de Galileu e Newton, admite-se que corpos de diferentes massas caem com a mesma aceleração em um campo gravitacional.

**Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

1) Imagine que você esteja dentro de uma caixa totalmente fechada sem ter qualquer tipo de interação com o meio externo. Para essa situação, imagine que você tenha dois estados de movimento possíveis para a caixa:

1º - A caixa está em repouso em relação a um referencial inercial S.

2º - A caixa está se movendo em linha reta e com velocidade constante em relação a um referencial inercial S.

De dentro da caixa, como você faria para constatar se a caixa está no primeiro estado de movimento ou no segundo?

2) Você ainda está na mesma caixa da questão 1, porém, agora os dois estados possíveis para a caixa são os seguintes:

1º - A caixa está flutuando no espaço, livre da ação de qualquer força, inclusive de campos gravitacionais.

2º - A caixa está no espaço, livre da ação de qualquer campo gravitacional, porém, está se movendo com aceleração constante em uma determinada direção e sentido.

De dentro da caixa, como você faria para constatar se a caixa está no primeiro estado de movimento ou no segundo?

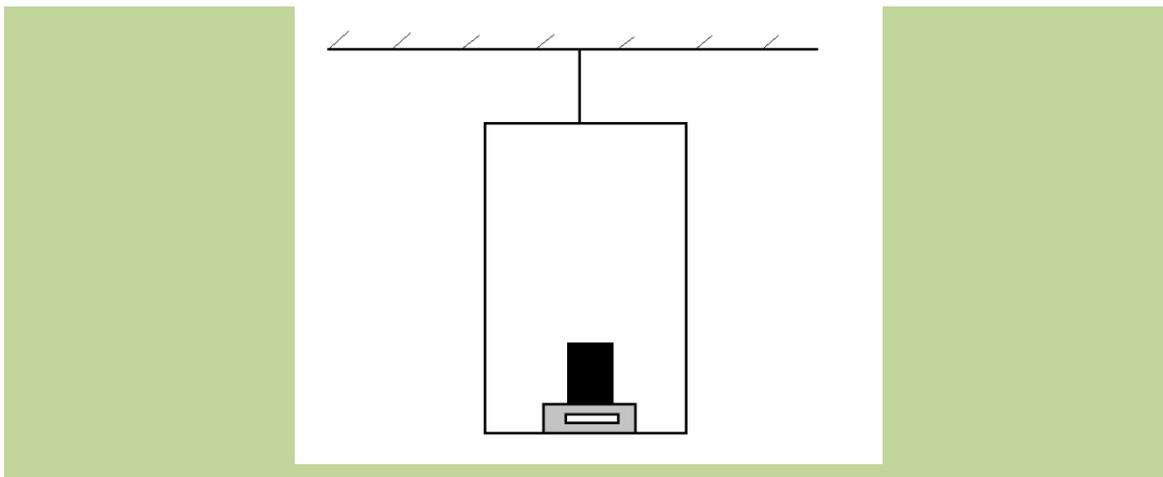
3) Seguindo o mesmo raciocínio das questões 1 e 2, imagine agora que os dois estados possíveis para a caixa são:

1º - A caixa está no espaço, livre da ação de qualquer campo gravitacional, porém, está se movendo com aceleração constante em uma determinada direção e sentido.

2º - A caixa está em repouso sobre a superfície de um planeta onde a aceleração da gravidade tem o mesmo valor em módulo do que a aceleração imprimida na caixa de acordo com o primeiro estado possível.

De dentro da caixa, como você faria para constatar se a caixa está no primeiro estado de movimento ou no segundo?

4) A figura abaixo mostra um elevador no vácuo, suspenso por uma corda em um campo gravitacional: inicialmente, o elevador está em repouso, e a balança mede o peso  $P$  do corpo. Se a corda for cortada, o elevador começa a se mover em queda livre com aceleração igual à aceleração da gravidade no local (imagine o experimento no vácuo). Para essa segunda situação, o valor do peso medido pela balança será nulo, maior, menor ou igual ao da situação anterior?

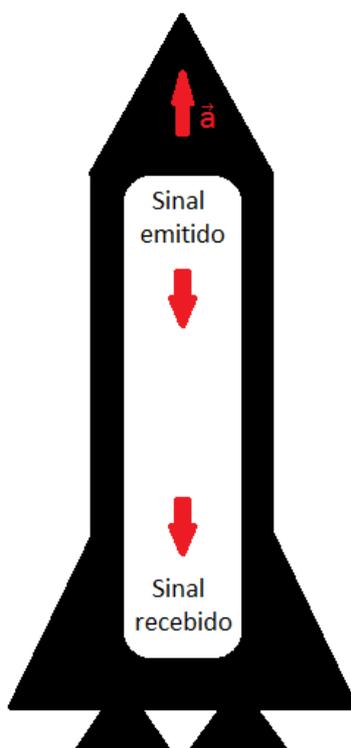


## 2.2 A relatividade do tempo de acordo com a TRG

De acordo com a TRR, o tempo passa mais devagar para um observador em movimento à medida que sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. No âmbito da TRG, isso também ocorre, porém, à medida que a intensidade de um campo gravitacional aumenta. Para que se possa compreender melhor o que leva a essa consideração, vamos utilizar o seguinte experimento de pensamento: imagina-se um foguete flutuando no espaço livre da ação de qualquer força, inclusive de campos gravitacionais. A altura do foguete é suficiente para a luz demorar um segundo para se deslocar do teto até o chão. Posicionam-se dois observadores, cada qual em uma das extremidades do foguete, carregando dois relógios de igual funcionamento precisamente sincronizados no início da experiência (Figura 37). De repente, o foguete começa a se movimentar com aceleração constante e uma velocidade relativamente alta, porém, sem se aproximar à da luz. A partir desse momento, pode-se diferenciar a extremidade correspondente ao teto e ao chão do foguete devido ao efeito da inércia, consequência da aceleração empregada no foguete.

O observador do teto envia sinais luminosos com intervalo de um segundo entre eles (de acordo com o seu relógio). Como o foguete está em um movimento acelerado e no sentido contrário ao da propagação da luz, cada sinal luminoso terá uma distância menor para percorrer do que se o foguete estivesse em repouso no espaço “vazio”. Considerando que a velocidade da luz é constante, o observador no chão mede os intervalos de tempo entre cada sinal menores do que um segundo (de acordo com o seu relógio), discordando do observador do teto, que mede em seu relógio os intervalos de um

segundo entre cada sinal emitido. Nesse sentido, o tempo passa de diferentes formas para os dois observadores, dependendo da altura em que se encontram no sistema acelerado.



**Figura 37: Foguete se movendo com aceleração constante**

Esse fato, provavelmente, não é difícil de aceitar. A questão é que, segundo o princípio da equivalência, essa ideia também se aplica se esse mesmo foguete estiver em repouso num campo gravitacional. Da mesma forma que na situação anterior, se o foguete estiver na Terra em repouso, caso o observador do teto envie um sinal luminoso a cada segundo (de acordo com o seu relógio), o observador que está no chão registrará (de acordo com o seu relógio) os intervalos de tempo menores que um segundo entre os sinais. Isso significa que o tempo passa mais devagar na superfície da Terra do que a uma grande altitude (no caso, o topo do foguete). A diferença de altura no campo gravitacional causa uma diferença no potencial gravitacional a que está sendo submetido cada um dos observadores. Nesse caso, pode-se atribuir a diferença na medida de intervalos de tempo à diferença entre os valores do potencial gravitacional. Em outras palavras, quanto maior for a diferença no potencial gravitacional entre dois observadores, maior será a diferença na medida de um intervalo de tempo.

Pode-se definir, por meio de uma expressão matemática, a diferença entre intervalos de tempo dependendo do potencial gravitacional. Nessa perspectiva, iniciaremos definindo o potencial gravitacional nas vizinhanças de uma massa  $M$ :

$$\Phi = - \frac{G M}{r}. \quad (30)$$

Onde  $\Phi$  é o potencial gravitacional,  $G$  é a constante gravitacional de Newton,  $M$  é a massa do corpo gerador do campo gravitacional e  $r$  é o raio do mesmo. Pode-se definir, de acordo com a TRG, a diferença entre o ritmo de dois relógios submetidos a diferentes potenciais gravitacionais da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_1} = \frac{1}{c^2} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (31)$$

Onde  $\Delta t_1$  é o intervalo de tempo entre dois eventos medido por um relógio onde o potencial gravitacional é  $\Phi_1$  e  $\Delta t_2$  é o intervalo de tempo entre dois eventos medido por um relógio onde o potencial gravitacional é  $\Phi_2$ . Analisando essa equação, percebemos que a diferença entre  $\Delta t_2$  e  $\Delta t_1$  depende diretamente da diferença entre  $\Phi_2$  e  $\Phi_1$ .

Para ilustrar a situação, pode-se realizar o seguinte teste: imaginemos dois observadores providos de relógios extremamente precisos e inicialmente sincronizados. Um deles sobe até o topo de um edifício extremamente alto, enquanto o outro permanece no solo. Segundo a teoria descrita até aqui, o relógio situado no solo deve se atrasar em relação ao que está no topo do prédio. Na verdade, é exatamente isso que acontece, e já foram realizadas algumas experiências semelhantes a essa, nas quais os resultados coletados coincidiram satisfatoriamente com as previsões da TRG de Einstein. O primeiro teste experimental foi realizado em 1962, onde foram posicionados relógios extremamente precisos no topo e no chão de uma torre de água. Foi observado que o relógio que estava no chão media o tempo mais lentamente do que aquele posicionado no topo da torre de água, em suficiente conformidade com as previsões da teoria de Einstein. No entanto, a diferença é muito pequena. Por exemplo, um relógio na superfície do Sol ganharia cerca de um minuto por ano em relação a outro na superfície da Terra. Para o efeito ser mais significativo, é necessária uma diferença muito maior no potencial gravitacional. Um exemplo seria a medida de um intervalo de tempo nas proximidades de

um buraco negro, onde o campo gravitacional é extremamente intenso, comparada a uma medida feita na superfície da Terra.

### **O paradoxo dos gêmeos no âmbito da TRG**

O tempo passa de formas diferentes dependendo da intensidade do campo gravitacional. A intensidade de um determinado campo gravitacional pode ser definida pela distância entre o centro de massa do corpo gerador do campo e o ponto que se analisa. Em outras palavras, pode-se dizer que a intensidade de um campo gravitacional como o da Terra, por exemplo, depende da altitude em que o observador se encontra. Para ilustrar a situação, pode-se utilizar um exemplo análogo ao paradoxo dos gêmeos utilizado na TRR. Porém, nesse caso, em vez de o movimento relativo afetar a passagem do tempo entre os irmãos gêmeos, a intensidade do campo gravitacional é que irá fazer surgir uma diferença de idade entre eles.

No âmbito da TRG, o paradoxo dos gêmeos pode ser enunciado da seguinte maneira: considerando dois irmãos gêmeos (ambos inicialmente com a mesma idade), um deles vai viver no topo de uma montanha muito alta e o outro permanece ao nível do mar. Segundo a teoria que foi descrita acima, o tempo para o gêmeo que permaneceu ao nível do mar passa mais devagar do que para seu irmão que foi viver no topo da montanha. Portanto, se alguns anos mais tarde os irmãos se reencontrarem, eles notarão uma diferença de idade, ou seja, o gêmeo que foi viver no topo da montanha apresentará uma idade maior. Nesse caso, a diferença é praticamente insignificante, mas seria bem maior, por exemplo, se um deles fosse viver nas proximidades de uma estrela de nêutrons ou de um buraco negro e o outro permanecesse na Terra. Isso ocorreria pelo fato de o campo gravitacional desses objetos ser significativamente mais intenso que o do nosso planeta.

A partir da TRG, a ideia de um tempo absoluto e independente dos fenômenos físicos foi totalmente descartada. Na TRR, o tempo passou a ser relativo para observadores que se movem um em relação ao outro. A TRG mostrou que isso também acontece se um observador estiver em repouso em um campo gravitacional. Com base nessas duas teorias, pode-se dizer que o tempo só seria o mesmo para dois observadores se não houvesse movimento relativo nem diferença no potencial gravitacional que age sobre ambos. Na TRG, também se vincula definitivamente tempo e espaço, no chamado

espaço-tempo, e este, por sua vez, pode ser distorcido ou deformado dependendo das condições da região do universo que se analisa.

**Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

- 1) De acordo com a teoria da relatividade geral, na superfície de qual dos planetas do nosso sistema solar o tempo passa mais devagar? Por quê?
- 2) Dois irmãos gêmeos conseguem arrumar um emprego na construção civil e ambos, coincidentemente, começam a trabalhar no mesmo edifício, o qual está entre os mais altos do mundo. Um deles trabalha no primeiro andar e o outro, no último. Com base na teoria da relatividade geral, qual dos gêmeos envelheceria mais depressa? Explique.
- 3) Em uma época em que viagens intergalácticas são comuns, uma espaçonave, devido a problemas mecânicos, fica parada nas proximidades de um buraco negro durante uma semana de acordo com o seu referencial. Para as pessoas na Terra, o tempo transcorrido será maior, menor, ou igual a uma semana?
- 4) Imagine um disco que gira com velocidade angular constante próxima à velocidade da luz. O disco se encontra sobre uma base que pode ser considerada como um referencial inercial. Sobre o disco, temos dois observadores: o observador A sobre o centro do disco e o observador B sobre a extremidade do disco. Os dois observadores estão providos de relógios idênticos que, antes de o disco começar a girar, estão perfeitamente sincronizados. Após o disco ter permanecido em movimento circular por um intervalo de tempo razoavelmente alto, de acordo com o referencial da base, assinale a alternativa correta:
  - a) O relógio de A atrasou em relação ao relógio de B.
  - b) Os dois relógios permaneceram sincronizados.
  - c) O relógio de B atrasou em relação ao relógio de A.

### 2.3 Espaço curvo

Newton interpretava os fenômenos gravitacionais como resultados de uma força que atua a distância e que depende do inverso do quadrado da mesma ( $1/r^2$ ). Einstein, ao elaborar a TRG, interpretou esse fenômeno de uma forma diferente. Segundo a TRG, os fenômenos relacionados à gravitação são uma consequência do fato de o espaço-tempo

não ser plano, e sim curvo. Dedicaremos este item à discussão sobre como se caracteriza um espaço curvo (por simplicidade, inicialmente, desconsideraremos a dimensão temporal) e como Einstein chegou à conclusão de que nosso espaço-tempo tem essa propriedade.

### **Atividade 9: Explorando espaços planos e curvos**

Por simplicidade, analisaremos, inicialmente, as propriedades geométricas de um espaço bidimensional. Para que fique mais claro, tomamos nosso espaço bidimensional como sendo uma folha de papel sobre a superfície de uma mesa plana. Um espaço plano pode ser entendido com base na geometria euclidiana. Em nossa atividade, vamos testar duas das proposições da geometria euclidiana: a soma dos ângulos internos de um triângulo é sempre igual a  $180^\circ$ ; o raio de uma circunferência é igual ao seu perímetro dividido por  $2\pi$ , ou seja,  $R = \frac{P}{2\pi}$ . A atividade será dividida em duas partes, e, nela, os estudantes serão desafiados a desenhar triângulos e circunferências em dois espaços: um plano e outro curvo.

#### **Primeira parte**

Inicialmente desenhe um triângulo e um círculo em uma folha de papel sobre uma mesa plana. Meça os ângulos internos do triângulo com a ajuda de um transferidor. Para medir o perímetro da circunferência, utilize uma linha, passe ela em volta da circunferência e depois meça o seu comprimento com uma régua. Essas são as duas medidas de que precisará para responder às questões abaixo.

#### **Questões relacionadas à primeira parte da atividade:**

- 1) Qual é o valor da soma dos ângulos internos do triângulo? O resultado está de acordo com a geometria euclidiana?
- 2) Com a medida do perímetro da circunferência, efetue a operação  $R = \frac{P}{2\pi}$ , encontrando o valor do raio da circunferência.

- 3) Com uma régua, meça o raio da circunferência e compare-o com o valor encontrado na questão 2. O valor medido com a régua coincide com o valor calculado na questão 2? O resultado está de acordo com a geometria euclidiana?
- 4) O espaço que você está estudando é plano ou curvo? Justifique a sua resposta.

### Segunda parte

Agora vamos testar as mesmas proposições em outro tipo de superfície. Vamos desenhar um triângulo e uma circunferência na superfície de uma esfera. Para tanto, utilizaremos bolas de isopor de aproximadamente 20 cm de diâmetro (podem ser consideradas aproximadamente esféricas). O procedimento é o mesmo que o da primeira parte da atividade, ou seja, desenha-se o triângulo e a circunferência medindo os ângulos internos do triângulo e o perímetro do círculo, respectivamente. Com os valores obtidos, responda às questões abaixo.

#### Questões relacionadas à segunda parte da atividade:

- 1) Qual é o valor da soma dos ângulos internos do triângulo? O resultado está de acordo com a geometria euclidiana?
- 2) Com a medida do perímetro da circunferência, efetue a operação  $R = \frac{P}{2\pi}$ , encontrando o valor do raio da circunferência.
- 3) Com uma régua, meça o raio da circunferência sobre a superfície da esfera. O valor do raio medido a partir da superfície da esfera coincide com o valor encontrado na questão 2? O resultado está de acordo com a geometria euclidiana?
- 4) O espaço que você está estudando é plano ou curvo? Justifique a sua resposta.

Partindo do experimento descrito, é possível caracterizar um espaço curvo, que, no caso, é aquele em que a geometria euclidiana não é válida. Einstein chegou à conclusão de que em nosso espaço a geometria euclidiana não é válida, ou seja, nosso espaço é curvo. Ele definiu que a curvatura do espaço, ou do espaço-tempo, como é caracterizado em sua teoria, é causada pela massa existente no universo. Discutiremos, a partir de agora, como Einstein chegou às considerações de que nosso espaço-tempo deve ser curvo. Para tanto, iniciaremos com um experimento imaginário bastante simples.

Tomemos uma base fixa que pode ser considerada um referencial inercial  $K$ . Nela estão dispostos dois discos planos: o disco 1, que se encontra em repouso em relação a  $K$ ; o disco 2, que se encontra em movimento circular com velocidade angular constante (em módulo) próxima a  $c$  em relação a  $K$  (Figura 38). Sobre o disco 1, encontra-se o observador A, e sobre o disco 2, o observado B. O observador A pode considerar o seu referencial como sendo inercial e, portanto, ele não experimenta a ação de nenhuma força resultante diferente de zero. Já o observador B, quando se localiza na periferia do seu disco, sente a ação de uma “força” na direção radial para fora, “força” esta que, para o observador A, pode ser interpretada como efeito da inércia. Para manter B em movimento circular, deve existir uma força na direção radial para dentro (força centrípeta). Essa força, de acordo com as leis de Newton, consequentemente, gera uma aceleração (aceleração centrípeta). Tomando as considerações feitas no item dedicado ao princípio da equivalência, essa força observada no disco 2 pode ser interpretada como efeito de um campo gravitacional da mesma forma.

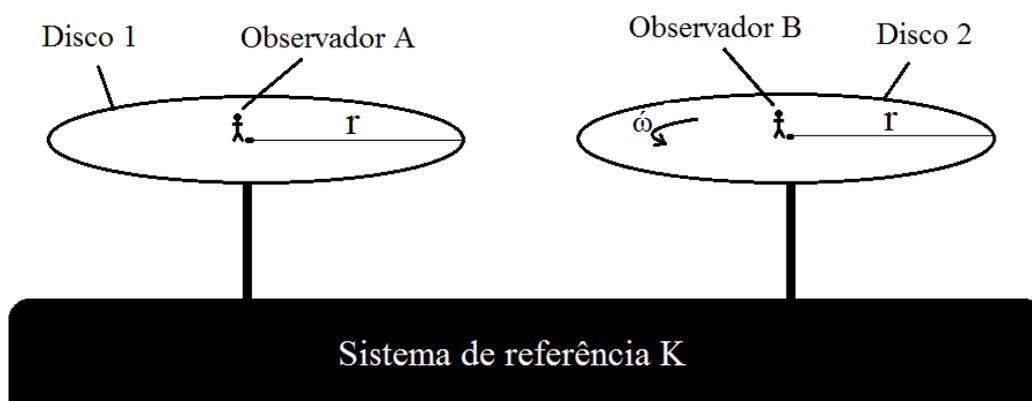


Figura 38: Experimento dos dois discos

Imaginemos, agora, que tanto A como B desejam aplicar a proposição da geometria euclidiana de que o raio de uma circunferência é igual ao perímetro dividido por duas vezes a constante  $\pi$ . Para isso, eles precisam medir o perímetro e o raio de seus discos. Para efetuar as medidas, eles se utilizam de réguas que precisam ser pequenas em relação ao raio do disco. Para testar a proposição da geometria euclidiana, o observador A calcula o raio a partir do valor do perímetro, utilizando a Equação 32. Posteriormente ele compara esse valor com o raio medido com o auxílio da régua. O observador A, então, conclui que o valor do raio calculado a partir do perímetro coincide com o valor medido,

o que está de acordo com a geometria euclidiana, e, conseqüentemente, caracteriza um espaço plano.

$$R = \frac{P}{2\pi} \quad (32)$$

Posteriormente, para testar os seus resultados, A observa B efetuar as suas medidas sobre o disco 2, que se encontra em rotação em relação a K. Quando efetua a medida do perímetro do disco, B o faz tangencialmente ao mesmo e, portanto, ocorre um encurtamento da medida do perímetro, conforme previsto pela TRR. Esse encurtamento ocorre devido ao fato de o movimento do disco ser paralelo à realização da medida. Conforme foi descrito no item dedicado à TRR, esse efeito é chamado de “contração das distâncias”. Já quando o observador B realiza a medida do raio de seu disco, a contração das distâncias não ocorre (isso porque a contração das distâncias ocorre somente na direção paralela ao movimento). Portanto, para o caso do disco em rotação em relação a K, quando se divide o valor do perímetro por  $2\pi$ , obtém-se um valor menor do que o raio medido.

Esse resultado só pode ser válido se considerarmos que o disco em rotação apresenta uma superfície curva. Na Figura 39,  $r$  é o raio, no caso de o disco ser considerado plano (sem rotação), e  $r'$  é o raio, no caso de o disco ser considerado curvo (disco em rotação). Fica, então, demonstrado que para um disco em rotação a sua superfície precisa ser considerada curva, e, de acordo com o princípio da equivalência, isso também é válido para um campo gravitacional da mesma forma. Nesse sentido, Einstein interpretou o campo gravitacional em termos da geometria, ou seja, em termos de curvatura. Tomemos o exemplo do sistema solar: o Sol curva o espaço-tempo a sua volta, e os planetas seguem trajetórias curvas, não porque existe uma força agindo a distância, e sim porque é o caminho mais próximo que une dois pontos em um espaço curvo.

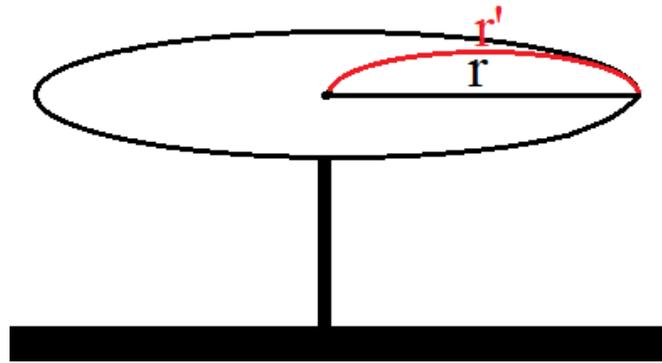


Figura 39: Excesso radial em um disco

Com base nas considerações feitas até então, podemos definir o efeito da gravitação em termos da curvatura em uma determinada região do espaço. Nesse caso, assim como no exemplo do disco giratório (Figura 38), um corpo com uma determinada massa  $M$  também terá uma diferença entre o raio medido e o raio previsto, ou seja, o raio medido será maior que o previsto. Isso ocorrendo, é possível calcular essa diferença, que chamaremos de “excesso radial”. O excesso radial depende diretamente da massa  $M$  do corpo, ou seja, quanto maior for a massa do corpo, maior será o excesso radial e, conseqüentemente, mais acentuada será a curvatura naquela região do espaço e mais intenso será o campo gravitacional em suas vizinhanças. A Equação 33 define o excesso radial dependente da massa  $M$  de um corpo perfeitamente esférico e com distribuição de massa homogênea.

$$\text{Excesso radial} = \frac{G}{3c^2} M \quad (33)$$

Onde  $G$  é a constante gravitacional de Newton,  $c$  é a velocidade da luz e  $M$  é a massa do objeto a ser analisado. Devemos lembrar que estamos analisando os corpos como se fossem esféricos, então, a massa  $M$  também pode ser obtida da seguinte maneira, para o caso de corpos com distribuição homogênea de massa:

$$M = \frac{4 \pi \rho r^3}{3} \quad (34)$$

Onde  $\rho$  é a densidade de matéria contida na esfera e  $r$  é o raio da esfera.

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

---

Se substituirmos os valores da Terra na Equação 2, por exemplo, em que a massa é de aproximadamente  $5,972 \times 10^{24}$  kg, teremos o seguinte:

$$\text{Excesso radial} = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{s}^2 \text{ kg}}{3 (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Resolvendo o primeiro termo da equação, temos:

$$\text{Excesso radial} = 2,5 \times 10^{-28} \text{ m/kg} \cdot 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$$

Multiplicando pela massa da Terra, chegamos ao seguinte valor aproximado:

$$\text{Excesso radial} = 1,5 \text{ mm}$$

Nesse sentido, o raio da Terra teria um desvio de 1,5 mm do previsto para o efetivo. Esse resultado tem o seguinte significado: você poderia, de alguma forma, fazer um furo até o centro do planeta Terra e medir o seu raio, que vamos chamar de “raio efetivo”. Por outro lado, você poderia obter o valor do raio a partir da superfície, utilizando a Equação 35:

$$S = 4\pi R^2 \tag{35}$$

A esse valor obtido a partir da superfície (Equação 35) vamos dar o nome de “raio previsto”. Se fôssemos comparar o valor do raio efetivo com o valor do raio previsto, chegaríamos à conclusão de que o raio efetivo excede o previsto aproximadamente em um valor de 1,5mm, o que, com as devidas aproximações, iria de acordo com o proposto.

Quanto maior for a massa do corpo a ser analisado, maior será a diferença entre o raio efetivo e o previsto. Tendo como base essas considerações, é possível estabelecer uma relação direta entre o excesso radial, determinado pela Equação 33, e a curvatura numa determinada região do espaço. Como essa curvatura define a intensidade do campo gravitacional, então, quanto maior o excesso radial, mais intenso será o campo gravitacional nas vizinhanças do corpo em questão.

### Atividade 10: Cama elástica – espaço curvo

Uma ferramenta que pode ser utilizada como alternativa para demonstrar alguns dos fenômenos que envolvem a forma do espaço-tempo é o experimento da cama elástica. Este se constitui de uma analogia utilizada para explicar o efeito gravitacional tal como é compreendido pela TRG de Albert Einstein. Uma descrição no que diz respeito à construção da cama elástica e ao seu uso relacionado a este item será feita a seguir. Visto que ela pode ser utilizada também em alguns dos itens que seguem, para cada item, serão apresentadas as alternativas de uso do equipamento.

#### PASSOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CAMA ELÁSTICA



**Materiais:** 8 canos de PVC 1/2“, 4 de aproximadamente 1 m e 4 de 70 cm; 4 curvas e 4 conexões em T para fazer os encaixes; 8 pregos 16 x 21; 1 m<sup>2</sup> de tecido (com elasticidade); uma ou várias bolas de gude; uma esfera metálica com diâmetro de 8 a 10 cm.

**Montagem da estrutura:** encaixar as curvas e as conexões T com os tubos, montando uma estrutura similar à de uma mesa. Posteriormente, fazer 8 furos nos tubos (todos bem distribuídos partindo dos cantos da estrutura). Esses furos servirão para colocar os pregos utilizados para esticar o tecido.

**Montagem do tecido:** na mesma posição que foram feitos os furos no PVC, devem ser costuradas alças para que se possa esticar o tecido (o tecido deve ficar bem esticado, e de forma uniforme, em todas as partes). A cama elástica é desmontável para facilitar o seu transporte.

Neste item, utilizaremos a cama elástica como um fechamento do conteúdo, no intuito de demonstrar como podemos entender o nosso espaço em termos de curvatura e como a concentração de massa num determinado ponto influencia nessa curvatura. Primeiramente deve-se estabelecer a analogia entre o tecido e o próprio espaço que nos rodeia. A princípio, por simplicidade, discutiremos a curvatura do espaço em duas dimensões, deixando de lado a terceira dimensão (espacial) e a quarta dimensão (temporal). Nesse caso, a superfície do tecido deve ser considerada como o próprio espaço, ou até mesmo o universo como um todo. Lembremos que se trata de uma analogia incompleta para o nosso mundo, de modo que: o espaço-tempo em nosso mundo não é exatamente um tecido e não há apenas duas dimensões significativas como o tecido da cama elástica. Nessa analogia, as bolas de gude e as esferas metálicas irão representar os corpos com massa existentes em nosso universo (superfície do tecido).

Inicialmente não se coloca nenhuma esfera sobre o tecido, ou seja, o universo estaria vazio, sem nenhuma massa, como mostra a Figura 40. Partindo das considerações feitas até aqui, os estudantes devem ser desafiados a responder às questões que seguem.



**Figura 40: Forma do espaço na ausência de massa**

**Questões:**

- 1) Nessas condições, qual é a forma do espaço?
- 2) Se abandonarmos qualquer objeto sobre o tecido (no universo), o que irá acontecer com o seu estado de movimento?

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

Em um segundo momento, após serem discutidas as características de um universo na ausência de massa (primeira parte da atividade), deve-se alternar entre esferas de diferentes massas sobre o tecido, como mostram as Figuras 41 e 42.



Figura 41: Forma do espaço com a presença de uma massa  $M$

Figura 42: Forma do espaço com a presença de uma massa  $M$  maior do que a anterior

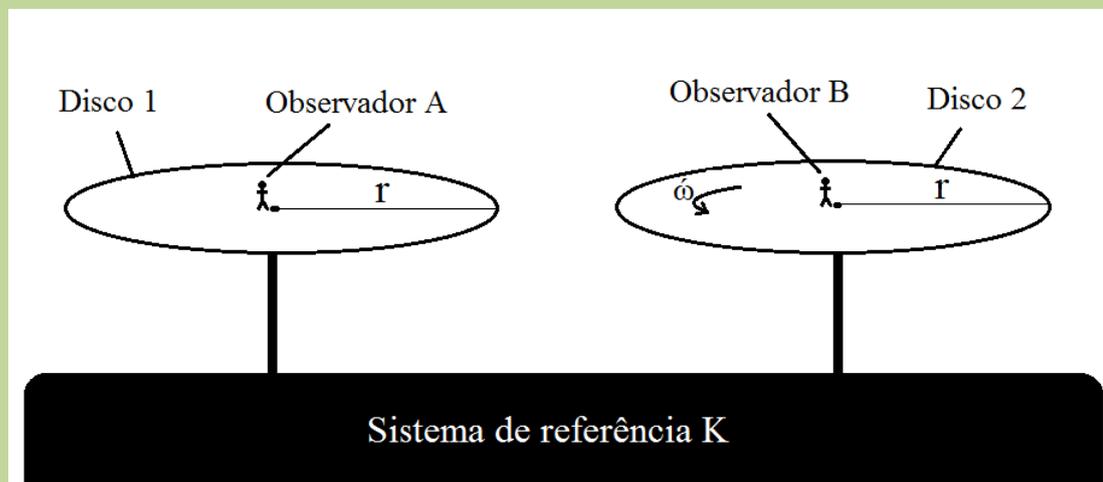
Partindo dessa segunda situação, são sugeridas as seguintes questões a serem respondidas pelos estudantes.

**Questões:**

- 1) O que acontece com a forma do espaço à medida que a concentração de massa em um determinado ponto vai aumentando?
- 2) Se abandonarmos qualquer objeto sobre o tecido (universo), o que irá acontecer com o seu estado de movimento?
- 3) Qual é a relação entre a concentração de massa num determinado ponto do universo e curvatura nessa região (ela aumenta, diminui ou permanece a mesma)?

**Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

- 1) Analise a figura abaixo.



Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

---

Temos dois discos (1 e 2 respectivamente). Ambos, quando estão em repouso em relação ao referencial inercial K, têm as mesmas medidas de raio e perímetro. O observador A pretende medir o perímetro do disco 1 a fim de calcular o seu raio por meio da relação  $R = \frac{P}{2\pi}$  (geometria euclidiana) e, posteriormente, pretende medir o raio para comparar o valor medido ao calculado. O observador B que está sobre o disco 2, que se move com velocidade angular constante próxima a c em relação a K, irá fazer o mesmo. Com base nessas considerações, responda:

- a) De acordo com o observador A, para qual dos discos (disco 1 ou 2) irá ocorrer uma diferença entre o raio medido e o calculado utilizando a equação  $R = \frac{P}{2\pi}$ ?
- b) No caso do disco em que ocorreu a diferença entre o raio medido e o calculado, qual dos valores foi maior e qual foi menor (o medido ou o calculado)?
- 2) Com base na questão 1, como se pode explicar a diferença entre os valores medido e calculado para o raio do disco?
- 3) Discuta como é possível diferenciar um espaço plano de um espaço curvo.
- 4) Qual é o principal argumento que leva à consideração de que o nosso espaço é curvo? Discuta esse argumento.
- 5) Calcule o excesso radial para os seguintes corpos:
  - a) Uma bola de boliche com massa aproximada de 5,0 kg.
  - b) A Lua, que apresenta massa aproximada de  $7,3474271 \times 10^{22}$  kg.
  - c) O planeta Júpiter, que apresenta massa aproximada de  $1,90 \times 10^{27}$  kg.
  - d) O Sol, com massa aproximada de  $1,9887973 \times 10^{30}$  kg.
  - e) A estrela mais brilhante da constelação de Órion, Rigel, com uma massa aproximada de  $3,9775946 \times 10^{31}$  kg.
- 6) Qual dos corpos citados na questão 5 curva mais o espaço em suas vizinhanças?
- 7) Qual dos corpos citados na questão 5 apresenta campo gravitacional mais intenso e qual apresenta campo gravitacional menos intenso?

## 2.4 A deflexão da luz em um campo gravitacional

### Atividade 11: Cama elástica – deflexão da luz

Uma das previsões da TRG consiste no fato de que, quando a luz passa próxima a uma estrela, a sua trajetória deve ser curvada. Esse curvamento na trajetória do feixe de luz ocorre porque o próprio espaço é curvo, e, nas proximidades de grandes concentrações de massa, essa curvatura é mais acentuada. A cama elástica pode ser utilizada para demonstrar de forma análoga como ocorre esse curvamento de um feixe de luz ao passar próximo a uma estrela, fenômeno conhecido como “deflexão da luz”.

Inicialmente nenhuma massa é posta sobre o tecido, ou seja, nenhuma massa existe no universo, portanto, também não há campos gravitacionais. Para esse caso, o nosso espaço é plano como mostra a Figura 43. Em um espaço com essas características, podemos testar qual seria a trajetória de um feixe de luz. Por analogia, vamos imaginar o feixe de luz como sendo uma bola de gude. Se a lançarmos sobre o tecido, a bola de gude seguirá em linha reta e, se desprezássemos o seu atrito com o tecido e com o ar, ela permaneceria nesse estado de movimento indefinidamente. A Figura 44 mostra a trajetória da bola de gude (feixe de luz) em um espaço sem matéria (plano).



Figura 43: Espaço “vazio”



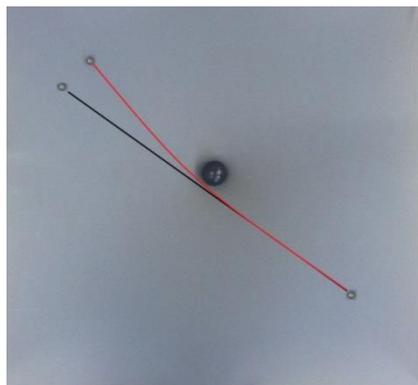
Figura 44: Trajetória de um feixe de luz

Agora colocamos uma grande concentração de massa em um determinado ponto do espaço, ou seja, colocamos uma esfera metálica com massa razoavelmente grande e

densa sobre o tecido. Para essa situação, o espaço já não pode mais ser considerado plano, como mostra a Figura 45. Nesse espaço, lançamos novamente o feixe de luz (bola de gude), de forma que este passe pelas proximidades da esfera metálica maior. Como se pode ver pela Figura 46, agora a trajetória não é mais uma linha reta. Ou seja, a luz defletiu ao passar nas proximidades da esfera. Na verdade, a luz (bola de gude) seguiu o que era o caminho mais próximo de uma linha reta, porém, em um espaço curvo.



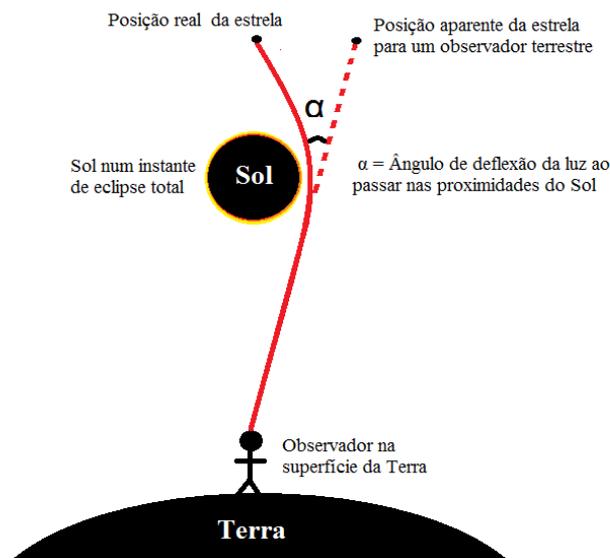
**Figura 45: Espaço na presença de matéria**



**Figura 46: Trajetória de um feixe de luz**

Em razão da curvatura no espaço-tempo, além da matéria, a luz, ao passar nas proximidades de uma massa, também se torna curvada. Sendo assim, a luz não se propaga em linha reta, mas por uma geodésica, que é o caminho mais próximo entre dois pontos em um espaço curvo. Quanto mais acentuada for a curvatura do espaço-tempo, maior será o ângulo de deflexão da luz ao passar nessa região do universo.

A Figura 47 é uma demonstração de como a trajetória de um raio luminoso é alterada ao passar próximo ao Sol num instante de eclipse total. A observação do fenômeno da deflexão da luz precisa ser feita num instante de eclipse total, para que se possa ver a posição das estrelas na periferia do Sol. Caso contrário, a luz solar impediria essa observação.



**Figura 47: Ilustração da deflexão da luz de uma estrela ao passar próxima ao Sol num instante de eclipse total**

O ângulo de deflexão de um feixe de luz que passa próximo a uma massa ( $M$ ), ou seja, o quanto a curvatura do espaço-tempo desvia a trajetória da luz, é definido pela TRG por meio da seguinte relação:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 R} \quad (36)$$

Onde  $R$  representa a distância máxima de aproximação entre o raio de luz e o centro da massa  $M$ , ou seja, geralmente considerado como o raio da estrela;  $G$  é a constante gravitacional de Newton; e  $c$  é a velocidade da luz. Para um raio tangente, a superfície do sol,  $R = 6,96 \times 10^8$  m (o raio do sol) e  $M = 1,99 \times 10^{30}$  kg (a massa do sol). Utilizando-se esses valores para resolver a equação, tem-se que o ângulo de deflexão da luz causada pelo Sol é de 1,75 segundos de arco. Como  $1^\circ$  equivale a 3 600 segundos de arco, então, em graus esse valor é equivalente a aproximadamente  $4,85 \times 10^{-4}^\circ$  (TIPLER, 2001).

A observação do desvio da luz perto do Sol foi realizada durante um eclipse total do Sol em 1919. Na ocasião, duas expedições britânicas se deslocaram, uma para Sobral, no estado do Ceará, Brasil, na qual foram enviados os astrônomos A. C. D. Crommelin e C. R. Davidson, e outra para a Ilha do Príncipe, no Golfo da Guiné, África, com os astrônomos Cottingham e Eddington. A observação precisava ser realizada durante um eclipse, pois nesse momento o Sol estaria encoberto, permitindo que se observassem as

suas proximidades com facilidade. Durante o eclipse, foram fotografadas as posições das estrelas próximas ao sol, e, alguns dias depois, foram realizadas novas fotografias da mesma região do espaço, porém, sem a presença do Sol na direção da propagação da luz das estrelas.

Após alguns meses de análise minuciosa, foram constatados, nas medidas realizadas no Ceará, Brasil, um ângulo de deflexão de 1,98 segundos de arco e, nas medidas realizadas na Ilha do Príncipe, África, um ângulo de 1,61 segundos de arco. A média dessas duas medidas, comparada com as previsões de Einstein, tem uma margem de erro de menos de 2%. Com o passar do tempo, foram desenvolvidos métodos mais precisos para realizar essas medições, tornando a margem de erro cada vez menor. Essa evidência contribuiu para a aceitação de uma teoria que mudaria significativamente a concepção que se tinha sobre o universo (MOURÃO, 1997).

**Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

- 1) Explique porque, ao passar nas proximidades de uma estrela, a luz tem sua trajetória curvada.
- 2) Por que a observação da deflexão da luz nas proximidades do Sol precisou ser realizada num instante de eclipse total?
- 3) Einstein publicou a TRG em 1915, porém, essa teoria foi mais amplamente aceita pela comunidade científica após a observação da deflexão da luz no eclipse solar de 1919. Levante argumentos para explicar esse fato, ou seja, por que somente após a observação experimental é que a TRG foi aceita por alguns cientistas, e inclusive pela comunidade de forma geral?
- 4) Determine, utilizando a Equação 36, o ângulo de deflexão da luz ao passar próximo à superfície das duas estrelas abaixo:
  - a) Sirius A, que apresenta massa aproximada de  $4,018 \times 10^{30}$  kg e raio de 1.190.000 km.
  - b) Rigel, com uma massa aproximada de  $3,9775946 \times 10^{31}$  kg e raio de 54.250.000 km.
- 5) Discuta quais elementos influenciam no valor do ângulo de deflexão da luz nas proximidades de uma estrela (ou seja, o que faz ele ser maior ou menor).

## 2.5 Buracos negros

### Atividade 12: Cama elástica – buracos negros

Como já foi discutido no item 2.3, à medida que aumenta a concentração de massa em um determinado ponto, aumenta também a curvatura do espaço-tempo nessa região. Se aumentarmos cada vez mais a concentração de massa em um determinado ponto, chegará um momento em que a curvatura será tão acentuada que nada conseguirá escapar da gravidade naquela região do espaço. É possível, pelo menos de forma análoga, demonstrar essa tendência com o auxílio da cama elástica. Basta utilizar diferentes massas com diferentes densidades, evidenciando que a curvatura não depende somente da massa naquela região, mas também da concentração de massa. As Figuras 47 e 48 mostram exemplos de corpos com massas  $M$  iguais, porém com diferentes densidades, e como isso afeta a curvatura do espaço e suas vizinhanças.



Figura 47: Massa  $M$  com densidade menor

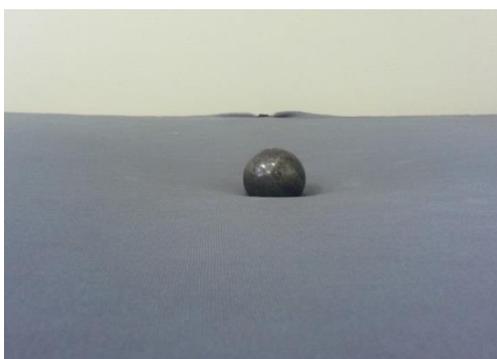


Figura 48: Massa  $M$  com densidade maior

Com base nessas figuras, basta imaginar que, se cada vez mais fosse aumentando a concentração de massa em um determinado ponto, mais acentuada se tornaria a curvatura nessa região. Se ultrapassássemos um determinado limite, o campo gravitacional (que nos termos da TRG é entendido como a deformação do espaço-tempo) se tornaria tão grande que nada poderia escapar de tal campo, nem a própria luz. Essa situação é a característica do que se conhece como “buraco negro”.

Os buracos negros podem ser, de forma geral, classificados em: estelar (formado pelo colapso gravitacional de estrelas de alta massa); supermassivo (encontrado no centro de galáxias, pode ter se formado pelo colapso gravitacional de nuvens de gás e poeira e de

aglomerados de milhões de estrelas); buracos negros de massa intermediária (também formados, possivelmente, por aglomerados de estrelas e nuvens de gás e poeira, mas em menor escala que os buracos negros supermassivos); buracos negros primordiais (poderiam ter se formado nos primórdios do universo, quando a pressão e a temperatura eram extremamente elevadas; alguns poderiam ser grandes o suficiente para durarem até os dias atuais, e outros poderiam ser de escala micrométrica).

Embora o início dos estudos sobre os buracos negros tenha se dado entre as décadas de 1960 e 1970, as primeiras especulações relacionadas à existência desses corpos remetem ao século XVIII. Nessa época, um astrônomo amador, John Michell, baseado na hipótese da teoria corpuscular da luz, levantou a hipótese de que a luz seria atraída pela gravidade, assim como a matéria. Nesse sentido, a luz emitida por um corpo, como o Sol, por exemplo, teria sua velocidade reduzida à medida que se afastasse dele. Ele determinou que, mantendo a densidade constante, o Sol precisaria ter o seu raio aumentado 500 vezes para que a luz parasse e retornasse à fonte antes de atingir o infinito. Devemos levar em consideração que John Michell não tinha conhecimento sobre a TRG, de modo que o estudo efetivo sobre buracos negros ainda levaria mais alguns anos para culminar em resultados significativos.

Em 1916, Karl Schwarzschild, baseado na TRG de Einstein, encontrou uma solução que permitia a existência dos buracos negros. Analisaremos, aqui, apenas os buracos negros estelares. Um buraco negro estelar se forma quando uma estrela exaure seu combustível termonuclear, responsável pela produção de calor e pressão que sustentam a estrela contra a sua própria gravidade. Quando isso acontece, a estrela começa a se contrair; se a sua massa não for muito grande, ela se contrai até um determinado raio e explode, começando a expandir novamente; se a sua massa for suficientemente grande, a estrela continua a se contrair até se tornar um buraco negro, fenômeno conhecido como “colapso gravitacional”. Para que uma estrela possa se tornar um buraco negro, o valor de seu raio deve ser menor do que o chamado “raio de Schwarzschild”, que é dado pela seguinte relação:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (37)$$

Onde  $G$  é a constante gravitacional de Newton,  $M$  é a massa da estrela e  $c$  é a velocidade da luz. Substituindo os valores para o Sol, podemos calcular qual deveria ser o

## Compreendendo a teoria da relatividade: dos fundamentos às suas consequências

---

seu raio, para que, ao exaurir o seu combustível termonuclear, ele se tornasse um buraco negro (deve estar claro que é fisicamente impossível o Sol se tornar um buraco negro, visto que existem outros parâmetros implicados nessa possibilidade).

$$r_s = \frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ kg } 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}$$

$$r_s = 2949,5 \text{ m}$$

O Sol apresenta um raio aproximado de  $6,96 \times 10^8$  m ou 696 000 km. De acordo com o resultado obtido, para o Sol se tornar um buraco negro, esse raio deveria ser reduzido para 2,9495 km, aproximadamente. Deve-se ter claro que, na verdade, não é assim que funciona, ou seja, para que uma estrela se torne um buraco negro, muitos outros fatores precisam ser levados em consideração.

Esse cálculo pode ser feito para qualquer estrela cuja massa e cujo raio sejam conhecidos. Outro fato importante é que a atração gravitacional é tão intensa nas proximidades desses objetos que nem a própria luz é capaz de escapar, por isso o nome de “buraco negro”. Nesse caso, a própria luz que seria emitida pela estrela colapsada (buraco negro) não escaparia da sua gravidade. Existe um limite de proximidade de um buraco negro para que a luz (e, conseqüentemente, qualquer tipo de informação) escape, o qual é chamado de “horizonte de eventos”. Logo, seria impossível receber a uma distância segura qualquer tipo de informação sobre o interior de um buraco negro.

Outro avanço significativo no que diz respeito ao estudo dos buracos negros foi dado por Stephen Hawking em 1974. Ele formulou que as leis da mecânica quântica aplicadas ao exterior de um buraco negro previam a sua evaporação, pela criação de partículas com espectro de energia térmica, com uma temperatura e entropia determinadas. A temperatura das partículas emitidas por um buraco negro, segundo essa teoria, é dada pela seguinte relação:

$$T = \frac{h c^3}{8\pi k G M} \quad (38)$$

Onde  $h$  é a constante de Plank ( $6,62606957 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$ ),  $c$  é a velocidade da luz,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,3806488 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ),  $G$  é a constante

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

gravitacional de Newton ( $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ kg}$ ) e  $M$  é a massa do buraco negro. Matematicamente, pode-se observar que, como a massa  $M$  é inversamente proporcional à temperatura  $T$ , então, a evaporação é menor à medida que se aumenta a massa do corpo. Com os dados do Sol, por exemplo, é possível determinar qual seria o valor de  $T$  se o Sol (hipoteticamente) colapsasse em um buraco negro:

$$T = \frac{6,62606957 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg}/\text{s} \text{ c}^3 (3 \times 10^8)^3}{8\pi \cdot 1,3806488 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg} \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1} \cdot 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} \text{ kg} \cdot 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}}$$

$$T = 3,85 \times 10^{-7} \text{ K}$$

Percebe-se que o valor ( $3,85 \times 10^{-7} \text{ K}$ ) é extremamente baixo, porém, de acordo com a Equação 38, ele aumenta à medida que a massa do buraco negro diminui. Essa descoberta teórica demonstra a existência de uma relação entre a gravitação, a termodinâmica e a mecânica quântica. Esse fato estimulou vários estudos no que diz respeito a uma grande unificação entre as interações fundamentais (gravitacional, eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte).

**Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

- 1) Chamamos alguns corpos de buracos negros. Discuta qual é o motivo de se usar esse nome.
- 2) Para que um corpo colapse em um buraco negro, é necessário que toda a sua massa esteja concentrada em um espaço muito pequeno. Em outras palavras, ao se assumir corpos esféricos, pode-se dizer que o corpo precisa ter um determinado raio chamado de “raio de Schwarzschild”. Nesse sentido, e de acordo com essa teoria, se conhecermos a massa de um determinado corpo, basta utilizar a Equação 37 para calcular qual deveria ser o seu raio para que este se tornasse um buraco negro. Sendo assim, calcule qual deveria ser o raio aproximado para que os seguintes corpos se tornassem buracos negros (hipoteticamente):
  - a) Uma pessoa com 80 kg de massa.
  - b) Um carro popular com 1 300 kg de massa.
  - c) A Lua, que possui aproximadamente  $7,3474271 \times 10^{22} \text{ kg}$  de massa.
  - d) A Terra, que tem uma massa aproximada de  $5,973332 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

- e) A estrela Sirius A, que apresenta aproximadamente  $4,018 \times 10^{30}$  kg de massa.
- 3) Para todos os corpos citados na questão 2, determine qual seria a temperatura das partículas emitidas após eles terem colapsado em buracos negros.
- 4) Com os dados obtidos nas questões 2 e 3, responda: qual dos buracos negros originados pelos colapsos dos respectivos corpos evaporaria mais rápido e qual evaporaria mais devagar?

## 2.6 Considerações sobre cosmologia

Por volta de 600 a.C. a 100 d.C., na Grécia antiga, foram elaborados os primeiros modelos geométricos do universo dos quais se tem registro. Os filósofos gregos tinham a crença de que as formas dos círculos e esferas seriam perfeitas. Acreditavam, também, que o universo era perfeito, e, em virtude disso, ao realizarem as observações do céu, atribuíram essas formas aos objetos celestes. Alguns filósofos, como Aristóteles, atribuíram a forma esférica para o próprio universo. Sendo assim, eles acreditavam em um universo finito em tamanho, porém eterno no tempo, ou seja, todo o universo estaria contido dentro de uma esfera maior. Foi nessa época, ainda, que Ptolomeu elaborou um modelo de universo em que a Terra ficava no centro com o Sol, e os demais planetas, orbitando a sua volta. Esse modelo perdurou até a época do renascimento e ficou conhecido como “modelo geocêntrico” (Oliveira e Saraiva 2000).

Embora o modelo dominante na Grécia antiga fosse esse, um filósofo grego chamado Aristarco de Samos (310-230 a.C.) havia proposto que, na verdade, o Sol é que deveria estar no centro do universo. Essa ideia foi descartada na época, até que Nicolau Copérnico, um astrônomo polonês que viveu entre 1473 e 1543, elaborou um modelo mais completo onde o Sol estava no centro do universo, e não a Terra. O modelo de Copérnico ficou conhecido como “modelo heliocêntrico”. Segundo a maioria dos autores, o pressuposto que levou Copérnico a elaborar seu modelo heliocêntrico não foi observacional nem matemático, mas sim um pressuposto puramente metafísico. Nas palavras do próprio Copérnico: “No meio de todos os assentos, o Sol está no trono. Neste belíssimo templo poderíamos nós colocar esta luminária noutra posição melhor de onde ela iluminasse tudo ao mesmo tempo?” (apud KUHN, 1990, p. 155). O modelo de Copérnico colocava o Sol no centro não só do sistema solar, mas de todo o universo. Nesse sentido, seu modelo pressupunha que o universo deveria ser esférico, finito em

extensão, porém imutável no tempo. Tanto o modelo de universo de Copérnico como o de Ptolomeu defendiam um universo esférico, finito no espaço e eterno no tempo. A única diferença é que Copérnico colocou o Sol no centro de tudo e Ptolomeu, a Terra.

Outro defensor do modelo heliocêntrico foi Galileu Galilei (1564 - 1642), um dos difusores daquilo que é conhecido até hoje como “o método científico”, no qual se analisam os pressupostos teóricos, extraíndo-lhes o máximo de previsões possíveis, e se comparam essas previsões com os dados observacionais. Galileu reuniu algumas das previsões de Copérnico com observações e uma série de deduções no intuito de corroborar para a aceitação do modelo heliocêntrico de universo.

Um fato importante percebido ao longo dos anos foi que, para manter a Terra e os demais planetas em suas órbitas em torno do Sol e a própria Lua em sua órbita em torno da Terra, era necessária a existência de um “poder atrativo”. Porém, a natureza e o funcionamento desse “poder” ainda eram desconhecidos pela ciência. Um cientista que se dedicou a essa questão foi Isaac Newton (1643-1727). Em 1687, Newton publicou um trabalho chamado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios matemáticos da Filosofia Natural*), no qual divulga uma das suas principais conclusões sobre o comportamento dos corpos: entre todos os corpos que apresentam massa, age uma força. Essa força depende da massa dos corpos e do inverso do quadrado da distância que os separa. A força deduzida por Newton passou a ser chamada de “força gravitacional” e, segundo ele, deve ser uma força de atração mútua entre os corpos que apresentam massa. A “teoria da gravitação universal” de Newton, como ficou conhecida, permitiu calcular com razoável precisão a força de atração entre os planetas e satélites naturais. Esse foi um significativo passo para o nosso entendimento do universo. Newton, assim como Galileu, Copérnico e Ptolomeu, também acreditava em um universo finito em tamanho, porém eterno no tempo.

A teoria de Newton para explicar a gravidade funciona muito bem e até hoje é discutida nas escolas e universidades. No entanto, assim como qualquer outra teoria, ela é limitada e teve de ser reformulada no início do século XX. A teoria newtoniana da gravidade explica o fenômeno gravitacional como sendo uma força que age a distância, e qualquer alteração na configuração dessa força seria sentida simultaneamente em todas as partes do universo. Como já foi discutido anteriormente, a ideia de um sinal com velocidade infinita, assim como a ideia de simultaneidade absoluta, entra em contradição

com a TRR. Essa aparente incompatibilidade levou Einstein a elaborar uma nova teoria da gravitação, a qual modificou drasticamente a concepção que se tinha sobre o universo.

Na TRG, o espaço-tempo é considerado curvo, e essa curvatura depende da massa que nele está contida. Se imaginarmos o espaço-tempo como um tecido que pode ser deformado e esticado, qualquer alteração nessa deformação se propagará como uma perturbação no tecido. Einstein chamou essa perturbação de “onda gravitacional” e calculou teoricamente a sua velocidade, que coincidiu com a velocidade da luz ( $c$ ). A TRG modificou substancialmente a nossa concepção de universo, pois o espaço e o tempo passaram de um simples palco onde os fenômenos ocorrem para algo dinâmico e deformável que interage com a energia e com a matéria contidas no universo. Essa concepção levou a que se assumisse que o universo deve ter uma forma geométrica que depende da densidade de matéria nele contida. Outra consequência da TRG é que a forma do universo poderia se tornar dependente do tempo, o que mais tarde levou à elaboração da teoria do Big Bang.

A primeira evidência observacional que levou ao modelo atual de universo ocorreu por volta de 1924, quando o astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953), utilizando o telescópio de 2,5 m de diâmetro do Monte Wilson, na Califórnia, constatou que a Via Láctea não era a única galáxia no universo. Nesse sentido, Hubble começou a medir as distâncias entre as galáxias e o planeta Terra. Uma das formas de se fazer isso é por meio da verificação da luminosidade das estrelas localizadas em cada galáxia, ou seja, quanto mais distante, menor é a luminosidade.

Quando Hubble começou a medir a distância entre as galáxias, o que ele esperava era que, caso estivessem em movimento, elas estivessem se movendo aleatoriamente, ou seja, em média, deveriam ter aproximadamente o mesmo número de galáxias se afastando e se aproximando de nós, isso para sustentar a ideia de um universo estático como um todo. Porém, os resultados alcançados foram um pouco diferentes dos esperados, pois ele observou que, na verdade, todas as galáxias estavam se afastando, o que pôde constatar por meio do efeito Doppler. Hubble publicou o seu trabalho relatando esses dados em 1929 (OLIVEIRA, 2014).

Ao se analisar uma onda emitida por uma fonte (seja ela sonora ou eletromagnética), uma das formas de se detectar se a fonte está se movendo em relação ao observador é o efeito Doppler. Por exemplo, quando um carro que se desloca em alta velocidade se aproxima de você, o seu som vai ficando cada vez mais agudo, até o ponto

em que ele passa por você e o som vai ficando cada vez mais grave enquanto se afasta. Durante a aproximação, no intervalo de tempo em que cada frente de onda é emitida, o carro se desloca uma determinada distância no sentido do observador; este, por sua vez, recebe um número maior de frentes de onda, ou seja, a onda o atinge com uma frequência maior (som mais agudo). Quando o carro começa a se afastar do observador, entre cada intervalo de tempo em que uma frente de onda é emitida, ele se desloca uma distância no sentido oposto. Sendo assim, a distância entre cada frente de onda fica maior, e a onda atinge o observador com uma frequência menor (som mais grave).

O exemplo anterior diz respeito a uma onda sonora, no entanto, o mesmo ocorre com uma onda eletromagnética, como no caso da luz visível. Porém, no caso da luz, a diferença de frequência é observada por meio do desvio em sua cor. Analisando as cores no espectro eletromagnético da luz visível em uma ordem crescente de frequência, temos: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. Logo, ao se analisar o afastamento ou a aproximação de uma fonte de luz, pode-se dizer que: se o desvio observado for para o vermelho, ela está se afastando, pois isso representa um desvio para uma frequência menor. Já se o desvio for para o azul, significa que a fonte luminosa está se aproximando, pois esse seria um desvio para uma frequência maior.

Quando observou as galáxias, Hubble esperava encontrar em média o mesmo número de galáxias com estrelas tendo sua luz desviada para o vermelho e para o azul, ou seja, um mesmo número de galáxias se afastando e se aproximando da Terra. No entanto, ele percebeu que todas as galáxias observadas estavam se afastando, pois tinham sua luz desviada para o vermelho. Percebeu, também, que, quanto mais distante estivesse a galáxia, maior era a sua velocidade de afastamento. A relação entre distância e velocidade de afastamento da Terra levou ao que é chamado de “lei de Hubble”. Ao plotar os valores da velocidade de afastamento das galáxias em função da distância em um gráfico, a distribuição desses valores tende a uma linha reta, como mostra a Figura 49.

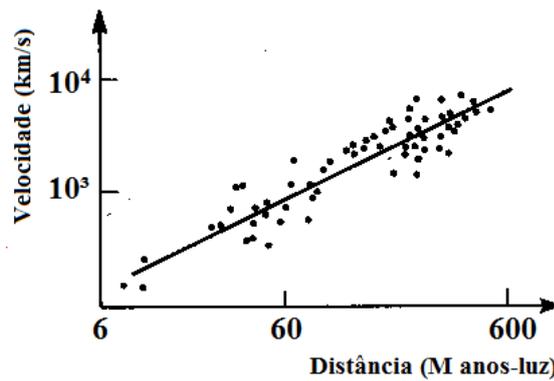


Figura 49: Gráfico da velocidade de afastamento das galáxias em função da distância – lei de Hubble

A partir do ajuste teórico do gráfico, Hubble elaborou a seguinte relação:

$$V = H_0 d \quad (39)$$

Onde:

V = velocidade de recessão das galáxias;

d = distância da galáxia;

$H_0$  = constante de Hubble (71 km/s/Mpc).

A constante de Hubble foi determinada a partir dos dados experimentais e representa o quanto a velocidade de uma determinada galáxia aumenta em função da distância. Como a distância nessa escala é medida em Mpc (1 Mega parsec equivale a  $3,09 \times 10^{19}$  km), então, a cada Mpc em que se aumenta a distância de uma determinada galáxia, a sua velocidade de recessão aumenta em 71 km/s. Essa relação também nos permite determinar (considerando que a velocidade das galáxias foi constante desde o Big Bang até os dias atuais) quanto tempo levou para as galáxias se moverem desde o instante em que estavam muito próximas até os dias atuais.

Considera-se a definição de velocidade como:

$$v = \frac{d}{t} \quad (40)$$

O que também se pode escrever da seguinte forma:

$$v = \frac{1}{t} d \quad (41)$$

Juntando a Equação 39 com a Equação 41, temos:

$$H_0 d = \frac{1}{t} d \quad (42)$$

Do que resulta:

$$H_0 = \frac{1}{t} \quad (43)$$

Ou, ainda:

$$t = \frac{1}{H_0} \quad (44)$$

Na Equação 44,  $t$  é o tempo transcorrido desde o instante em que as galáxias estiveram todas juntas até os dias atuais, ou seja, a idade do nosso universo (considerando que a velocidade das galáxias foi sempre a mesma). Para se determinar a idade do universo, basta fazer  $1/H_0$ , porém, deve-se levar em consideração que 1 Mpc equivale a aproximadamente  $3,09 \times 10^{19}$  km e que um ano apresenta aproximadamente  $3,15 \times 10^7$  s. Nesse caso, é possível, mantendo a coerência entre as unidades, determinar a idade do universo em anos, efetuando a seguinte operação:

$$t = \frac{1}{\frac{71 \frac{km}{s}}{3,09 \times 10^{19} km \cdot 3,15 \times 10^7 s}}$$

$$t = 13,7 \text{ bilhões de anos}$$

Se considerarmos que as galáxias se moveram sempre com velocidade constante, o nosso universo teria aproximadamente 13,7 bilhões de anos. Se a velocidade tivesse diminuído com o tempo, devido à ação da gravidade, então, esse valor seria maior, e se a velocidade tivesse aumentado, então, esse valor seria menor. Algumas observações mais recentes mostraram que a velocidade de recessão das galáxias atualmente está

aumentando, aumento que é atribuído à chamada energia escura, sobre a qual ainda pouco se sabe.

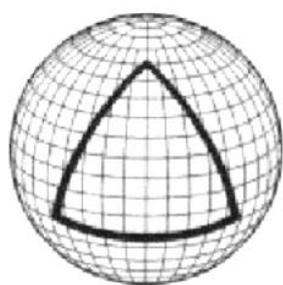
A ideia de que tudo no universo observável está se afastando de nós pode sugerir o resgate do antigo modelo grego em que a Terra era considerada o centro do universo. Porém, para refutar essa hipótese, pode-se realizar um experimento bastante simples: imagine o universo como um balão de festa de aniversário. Com uma caneta, marque vários pontos equidistantes no balão (os pontos serão as galáxias). Comece a inflar o balão e perceba que os pontos começam a se afastar uns dos outros. Adotando como ponto de referência um ponto qualquer daqueles que foram marcados a caneta, perceba que todos os outros pontos na superfície do balão se afastam dele. No entanto, se você mudar seu ponto de referência, o fenômeno observado será o mesmo, ou seja, a partir de qualquer referencial adotado na superfície, todos os outros pontos irão apresentar um movimento de afastamento. Sendo assim, o fato de observarmos que todas as galáxias estão se afastando de nós não significa que somos o centro do universo.

As evidências observacionais descritas anteriormente contribuíram para a elaboração do modelo de universo dinâmico que se tem nos dias atuais. Porém, a expansão do universo poderia ter sido prevista muito tempo antes, a partir da teoria da gravitação universal de Newton. A teoria de Newton afirma que o efeito gravitacional é uma força que age mutuamente entre os corpos com massa, e essa força depende do quadrado da distância entre eles. Não é difícil perceber que se tudo no universo está se atraindo mutuamente, como diz a teoria de Newton, então, conseqüentemente, o nosso universo não poderia existir na forma que o conhecemos. Não haveria força contrária para superar a atração gravitacional, e o universo iria se contrair até entrar em colapso. Mesmo que o universo tivesse sido estático em algum momento, logo a atração gravitacional daria início à sua contração. Se o universo estivesse se expandindo lentamente, chegaria um momento em que a gravidade faria ele parar de expandir e logo começar a se contrair. Desse modo, a velocidade de expansão deve superar uma determinada velocidade crítica, a qual pode ser comparada à velocidade necessária para um foguete ser lançado para o espaço e escapar da gravidade terrestre (aproximadamente 11 km/s). Nesse caso, costuma-se chamar essa velocidade de “velocidade de escape”.

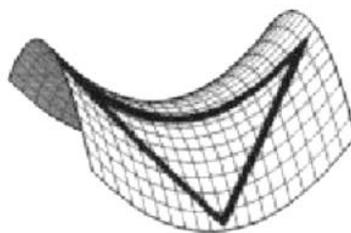
O modelo de universo em expansão poderia ter sido previsto em qualquer momento após a publicação da teoria da gravidade de Newton. Todavia, o modelo de universo estático ainda perdurou por muitos anos. Albert Einstein também tinha

convicção de que o universo deveria ser estático e, quando elaborou a TRG (que previa um universo em expansão), introduziu o termo “constante cosmológica”, cujo efeito seria de uma força contrária à gravidade. Einstein pensou que poderia ajustar essa constante de forma a sustentar um universo estático. Mais tarde, contudo, ele próprio chamou a constante cosmológica de seu “maior erro”. A TRG é, até os dias atuais, a teoria que melhor explica o comportamento do universo em grande escala, no entanto, poucos foram capazes de aceitar com facilidade algumas das suas consequências. A ideia de um universo não estático é uma delas, que foi a princípio descartada pelo próprio Einstein.

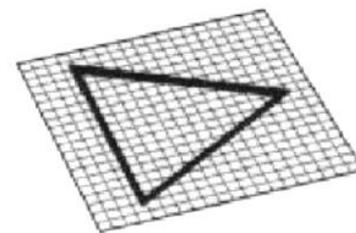
Um dos primeiros cientistas que, em vez de tentar encontrar uma forma de manter o modelo de universo estático, propôs-se a explicar o comportamento de um universo não estático foi o físico e matemático russo Alexander Friedmann (1888-1925). Em 1922, alguns anos antes das observações de Hubble, ele previu exatamente o que seria descoberto mais tarde por este último, ou seja, que o universo está se expandindo. Friedman, resolvendo as equações da TRG, chegou a três modelos de universo: fechado, aberto e plano. No universo fechado, a densidade de matéria é suficientemente alta para que, em um determinado ponto no tempo, a expansão reverta – nesse caso, o universo começaria a se contrair novamente. No universo aberto, a densidade da matéria seria muito baixa para reverter a expansão, e o universo continuaria a se expandir para sempre. O universo plano seria o limite entre o aberto e o fechado – nesse caso, a velocidade de expansão diminuiria no decorrer do tempo e tenderia a zero no infinito (OLIVEIRA, 2014). A Figura 50 consiste em uma representação artística de como seria a forma de um universo fechado, aberto e plano, respectivamente.



Universo fechado



Universo aberto



Universo plano

**Figura 50: Formas do espaço**

Paralelamente a Friedman, o padre e cosmólogo belga Georges-Henri Édouard Lemaître (1894-1966) também propôs um modelo de universo não estático. Em 1927,

Lemaître propôs um modelo para o universo que foi provavelmente a primeira versão da teoria do Big Bang. Ele sugeriu que, no início do universo, toda a matéria estaria concentrada em um ponto muito pequeno, que ele chamou de “átomo primordial”. Esse átomo teria se partido em incontáveis partes, dando início à expansão do universo. Segundo a ideia de Lemaître, cada pedaço foi se dividindo em partes cada vez menores, até formarem os átomos que estão presentes hoje no universo. De acordo com esse modelo, a matéria teria se formado numa espécie de fissão nuclear em escala cósmica. A teoria de Lemaître apresenta alguns erros, no entanto, inspirou a elaboração dos modelos modernos de universo, e, hoje, Lemaître e Friedman são considerados os pais da cosmologia moderna (OLIVEIRA, 2014).

A ideia de que tudo esteve concentrado em um ponto extremamente pequeno no passado pode ser deduzida por meio da TRG de Einstein. Resolvendo as equações de Einstein para um universo com a quantidade de matéria que é observada no nosso universo, em algum momento de seu passado (há aproximadamente 13,7 bilhões de anos), a distância entre as galáxias era zero. Isso significa que, nesse momento, a curvatura e a densidade do universo seriam infinitas, caracterizando o que conhecemos como “Big Bang”. A teoria do Big Bang explica como o universo surgiu de um ponto infinitamente pequeno, denso e quente e começou a se expandir até o estado em que se encontra nos dias atuais. Segundo essa teoria, o universo era extremamente quente nos instantes que precederam o Big Bang e, à medida que ele foi expandindo, a sua temperatura foi diminuindo. Por volta de um segundo após o Big Bang, devido à sua expansão, a temperatura do universo teria diminuído aproximadamente 10 bilhões de graus Celsius, temperatura equivalente a aproximadamente mil vezes a temperatura do centro do Sol. Hoje em dia (aproximadamente 13,7 bilhões de anos após o Big Bang), a temperatura do universo é de 3 K, ou aproximadamente - 270 °C.

A teoria do Big Bang explica satisfatoriamente vários aspectos relacionados à origem e à evolução do universo, no entanto, algumas questões ainda vêm sendo discutidas pelos cientistas, como, por exemplo: o que existia antes do Big Bang? Podem existir outros universos? O que acontecerá depois que o nosso universo deixar de existir na forma como o conhecemos? Ainda não se tem uma resposta convincente para muitas dessas questões (que, aliás, há algum tempo, seriam vistas como aparentemente desvinculadas da ciência), porém, é a sua busca que motiva o meio científico e, naturalmente, acaba gerando outras perguntas, e assim por diante.

### Atividade 13: Cama elástica – universo dinâmico

O experimento da cama elástica também pode ser utilizado para se discutir teorias cosmológicas a respeito da origem e evolução do universo. Para se chegar à ideia de um universo em expansão, pode-se recorrer a uma incompatibilidade da teoria da gravitação de Newton com o universo estático por ele defendido. Ou seja, se existe uma força somente de atração (que se saiba, não existe tipo algum de interação gravitacional que seja de repulsão) entre todos os corpos materiais do universo, então, como ele pode ser estático? Essa questão pode ser levantada a partir da teoria da gravitação de Newton, assim como da TRG de Einstein. De acordo com a teoria de Einstein, o fenômeno gravitacional é uma consequência da curvatura do espaço-tempo, como já foi definido anteriormente. Porém, a massa presente no universo curva o espaço-tempo em um único sentido. Nesse caso, o universo como um todo deveria se curvar de tal forma, devido à massa nele existente em larga escala, que entraria em colapso, e o mesmo se pode concluir com base na teoria de Newton.

A atividade experimental consiste em uma analogia desenvolvida para observarmos o comportamento dos corpos em um espaço curvo. Inicialmente é necessário imaginar o tecido como o próprio universo e as esferas metálicas como os corpos materiais nele presentes. O primeiro experimento consiste em abandonar algumas esferas com velocidade inicial nula sobre o tecido. Observa-se, como está ilustrado na Figura 51a, que as esferas começam a se aproximar. A Figura 51b mostra as esferas após a colisão que ocorreu devido à tendência atrativa que existe entre elas.



**Figura 51a: Esferas se aproximando**



**Figura 51b: Esferas após a colisão**

Posteriormente lançam-se as esferas com velocidades iniciais diferentes de zero no sentido contrário umas das outras (velocidade de afastamento). Nas Figuras 52a e 52b, percebe-se que é superada a força de atração que as levaria a colidirem.



**Figura 52a: Esferas se afastando**



**Figura 52b: Esferas continuam a se afastar**

Essa atividade pode ser utilizada para demonstrar que, segundo as teorias de Newton e Einstein, o universo não poderia ser estático, ou seja, ele pode estar contraindo ou expandindo. Deve-se ter clareza de que a atividade se trata de uma analogia e, portanto, não pode ser interpretada como uma demonstração precisa do fenômeno.

#### **Questões sugeridas para fechamento deste tópico:**

- 1) Para a maioria dos gregos da antiguidade, o universo era considerado finito ou infinito?
- 2) No que diz respeito aos modelos de universo que surgiram desde os gregos até Copérnico, discuta o significado dos termos “modelo geocêntrico” e “modelo heliocêntrico”.
- 3) Partindo da teoria da gravitação universal de Newton, como seria possível elaborar a teoria de que o universo não é estacionário?
- 4) Qual foi a evidência experimental que levou Hubble a considerar que, de fato, o universo poderia estar expandindo?
- 5) Nos dias atuais, a velocidade de expansão do universo está aumentando, diminuindo, ou permanece sempre a mesma?

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

---

6) Levante algumas questões (perguntas) para serem discutidas em sala de aula sobre a teoria do Big Bang. As questões devem ser sobre alguma falha ou incompletude da própria teoria.

## SUGESTÃO DE LEITURA COMPLEMENTAR: VIAGENS NO TEMPO

Quem nunca sonhou em quebrar as barreiras do tempo e conhecer o futuro com suas maravilhosas tecnologias, ou, ainda, poder visitar o passado e, por exemplo, encontrar-se consigo mesmo, fornecendo para “o seu eu do passado” o número premiado da loteria, ou mesmo conceder informações preciosas sobre a bolsa de valores? No decorrer dos tempos, essas possibilidades foram largamente exploradas pelos autores de ficção científica. Um dos primeiros e mais famosos, certamente, é H.G. Wells, com a sua obra *A máquina do tempo*. Wells relata a reação de seu viajante, ao abaixar a alavanca de sua máquina que o faria viajar no tempo:

Eu pareci rodopiar. Tive a sensação de que caí como num pesadelo e, ao olhar ao redor, vi que o laboratório permanecia exatamente como antes. Algo teria acontecido? Por um momento suspeitei de um truque de meu intelecto. Depois reparei no relógio. Um momento antes, parecera-me que marcava um minuto antes das dez, e agora eram quase três e meia!... Empurrei a alavanca até a posição extrema. Fez-se noite como o apagar de uma lâmpada, e no momento seguinte nasceu o dia (1951, p. 207).

Além desse clássico de H. G. Wells, outras obras se consagraram abordando esse tema tanto na literatura como no cinema. No filme de Steven Spielberg, *De volta para o futuro*, o personagem Dr. Brown constrói uma máquina do tempo em um Delorean, no qual ele e o personagem Mart Mcfly visitam o passado e voltam para o futuro. A ideia também é explorada em *O exterminador do futuro*. No filme, um robô do futuro é enviado para o passado com o objetivo de assassinar a mãe de John Connor, antes que ele nasça, a fim de evitar que ele se torne o futuro líder da resistência humana em uma guerra épica entre humanos e máquinas.

Como se percebe, a possibilidade de viajar no tempo sempre esteve profundamente ligada à imaginação das pessoas, o que se pode constatar pelo enorme sucesso de público obtido por essas obras. No entanto, nos últimos anos, o assunto deixou de ser um tema exclusivo dos autores de ficção científica e passou a ser estudado por físicos de forma científica.

Analisando as teorias que foram abordadas nos capítulos anteriores, nota-se que, a partir da teoria da relatividade de Einstein, o tempo passou a ser uma grandeza que nem sempre tem a mesma medida para todos os observadores, ou seja, ele é relativo. Como,

neste item, o objetivo é abordar a possibilidade de realizar viagens não convencionais para o futuro, iremos nos deter à teoria da relatividade especial.

Na teoria da relatividade especial, como já foi estudado anteriormente, o tempo passa mais devagar para um determinado observador à medida que a sua velocidade se aproxima da velocidade da luz. Com base nessa ideia, é coerente afirmar que, para alguém viajar para o futuro, basta que se mova com uma velocidade muito alta (próxima à da luz), a fim de que o seu tempo passe bem devagar, e, como o tempo para o resto do planeta Terra continuará passando na velocidade convencional, então, quando o observador parar de se mover, terá dado um salto para o futuro.

Assim, de acordo com essas informações, as viagens não convencionais no tempo estão subsidiadas por uma segura teoria científica, que é a teoria da relatividade especial de Albert Einstein. O único problema é que, como mencionado acima, para que se obtenha um retardamento considerável na passagem do tempo para um observador, é necessário que ele se mova com uma velocidade próxima à da luz. Tendo em vista que uma máquina do tempo seria, provavelmente, uma nave espacial, hoje a humanidade ainda não dispõe de tecnologia suficiente para acelerar uma quantidade tão grande de massa até uma velocidade tão alta. Ou seja, a possibilidade física existe, mas a engenharia ainda não desenvolveu um método de tornar isso prático.

Contudo, pequenas massas como elétrons e outras partículas subatômicas podem ser aceleradas a uma velocidade quase igual à da luz (sem nunca se igualar a essa velocidade limite). Nos modernos aceleradores de partículas, como o LHC (*large hadron collider*, em português, “grande colisor de hádrons”), partículas são aceleradas a velocidades muito altas (99,9999991% da velocidade da luz), e o efeito da dilatação temporal é comprovado, ou seja, essas partículas são viajantes do tempo (KAKU, 2010).

Saindo do mundo das partículas subatômicas e voltando para o mundo macroscópico, muitos seres humanos já realizaram viagens no tempo para o futuro. Na verdade, toda vez que um foguete é lançado para o espaço cósmico, os tripulantes experimentam um sutil salto no tempo, devido à alta velocidade do foguete. No entanto, a viagem para o futuro é de apenas uma fração de segundo. Por exemplo, o recordista de viagens no tempo é o cosmonauta Russo Serguei Avdeyev, que orbitou 748 dias e foi lançado 0,02 segundos para o futuro em relação às pessoas que permaneceram em repouso na Terra (KAKU, 2010). Esse dado parece insignificante, mas, para a Física, o importante é que o fenômeno existe, independentemente das suas proporções. Em

resumo, no que diz respeito às viagens para o futuro, a Física já fez a sua parte. A questão agora é um problema de engenharia, ou seja, é preciso construir um aparelho (que pode ser uma espaçonave) capaz de acelerar (sem qualquer dano para a tripulação e para a máquina) a uma velocidade próxima à da luz um corpo com uma massa consideravelmente alta a ponto de poder transportar um ser humano.

Mesmo que a engenharia ainda não tenha realizado esse feito, podemos imaginar como seria uma máquina do tempo. Tal máquina deveria ser uma espaçonave que pudesse viajar a 99% da velocidade da luz para que um dia a bordo fosse equivalente a aproximadamente um ano no planeta Terra. Para tanto, seria necessária uma quantidade tremendamente alta de energia e um período de cerca de seis anos de aceleração à potência máxima. Pode-se pensar, ainda, em outra possibilidade, que é a de construir um trem preso a um trilho que dê a volta no planeta Terra. Esse trem deveria acelerar até conseguir efetuar sete voltas por segundo ao redor da Terra, de modo que uma semana a bordo fosse equivalente a cem anos para quem estivesse em repouso no solo (DISCOVERY CHANNEL, 2010).

As duas possibilidades exigiriam uma engenharia muito sofisticada, e, com a tecnologia de que a humanidade dispõe até o momento, isso é praticamente impossível de ser realizado. No entanto, a possibilidade física existe, faltando apenas uma tecnologia avançada o suficiente para desenvolver os equipamentos necessários para viajar no tempo e no espaço.

As viagens no tempo para o futuro, como foram estudadas neste item, são fisicamente possíveis, e inclusive já foram observadas experimentalmente em pequena escala. No entanto, de que adiantaria poder ir para o futuro distante e não poder mais retornar? Afinal, todas as pessoas conhecidas do viajante do tempo já teriam morrido, e o mundo iria lhe parecer um lugar totalmente estranho. Ao se analisar essas implicações, verifica-se que o ideal seria, além de viajar para o futuro, poder voltar também para o passado.

Nos filmes de ficção científica, as viagens para o passado são largamente utilizadas. Em *Super-Homem I*, quando descobre que a personagem Lois Lane morreu, o herói decide fazer o tempo correr de forma inversa. Para isso, ele gira ao redor da Terra a uma velocidade tão alta que chega a ser maior que a da luz, e o planeta começa a girar no sentido oposto, tal como os ponteiros dos relógios. Assim, ele viaja para trás no tempo e consegue salvar a sua amada. Embora o filme *Super-Homem* seja uma obra de ficção

científica, a obra demonstra um fato físico. As teorias científicas que permitem as viagens para trás no tempo, geralmente, estão vinculadas à necessidade de se viajar mais rápido do que a luz. A teoria da relatividade especial de Einstein diz que a luz é a velocidade limite no universo e que nenhum sinal pode ser enviado mais rápido do que ela. Logo, para que se possa viajar para trás no tempo, deve-se encontrar uma forma de burlar esse limite.

Para realizar o estudo das possibilidades de fazer viagens mais velozes do que a luz, pode-se utilizar a teoria da relatividade geral de Einstein. Nessa teoria, como já foi visto, o espaço-tempo pode ser distorcido, fazendo surgir algumas possibilidades. Uma delas seria esticar o espaço atrás da posição em que se encontra uma espaçonave, tocando, assim, o espaço que está na frente, o que daria a impressão de que a espaçonave viajou mais rápido do que a luz. No entanto, ela se manteria em repouso, e o espaço-tempo é que teria sido deformado. O único detalhe é que, até os dias de hoje, nenhuma forma de energia que seja capaz de produzir essa distorção foi encontrada em nosso universo, e nem mesmo foi observada alguma região no universo em que esse fenômeno seja produzido naturalmente. Um meio de se causar essa distorção consiste na chamada “velocidade de Alcubierre”, proposta por Miguel Alcubierre, que seria semelhante à “velocidade de dobra” vista em *Jornada nas estrelas* (KAKU, 2010).

Na série de *Jornada nas estrelas*, frequentemente, se houve falar na velocidade de dobra. Fisicamente, pode-se dizer que essa velocidade seria alcançada ao se romper a velocidade limite da luz. No entanto, na teoria da dobra espacial, quando a espaçonave rompe a barreira da luz, o que acontece, na verdade, são distorções profundas no espaço-tempo para preservar a velocidade limite. Então, não é a espaçonave que está se movendo mais rápido do que a luz, e sim o espaço-tempo que está se dobrando devido à enorme propulsão empregada pela nave espacial.

Como já mencionado, a velocidade de Alcubierre é a chave para se entrar na chamada velocidade de dobra. Porém, para se alcançar essa velocidade, seria necessária uma outra forma de energia, chamada de “energia negativa”, também chamada, dependendo do autor, de “matéria de densidade de energia negativa”. Optaremos, aqui, pelo termo “energia negativa” (matéria negativa e antimatéria são coisas bem diferentes, pois a segunda tem energia positiva, mas carga invertida, e a primeira ainda não foi encontrada no universo) (KAKU, 2010).

A energia negativa seria mais leve do que tudo e, por consequência, curvaria o espaço-tempo de forma negativa, ou seja, se a energia positiva curva o espaço-tempo de forma positiva, como uma esfera, a energia negativa curvaria o espaço-tempo de forma negativa, como o formato de uma sela. Essa energia com características tão peculiares poderia ser utilizada para curvar o espaço-tempo na frente de uma espaçonave, permitindo-lhe voltar para o ponto no espaço em que estava antes mesmo de ter partido, ou seja, ela viajaria do futuro para o passado.

Uma outra forma de viajar para o passado, e a primeira a ser apresentada ao meio científico, foi a proposta por Kurt Gödel. A princípio, razoavelmente simples, ela parte de uma solução das equações da relatividade geral, pressupondo que o universo todo estaria girando. Essa rotação não é uma rotação global, e sim local, ou seja, o universo gira em torno de eixos locais, e não em um único eixo central. Essa propriedade permite a existência de curvas do tipo tempo fechadas, que são chamadas de CTC (*closed timelike curve*). Uma CTC seria uma trajetória desenvolvida por um corpo que o levaria para o mesmo local espacial de partida, porém, num momento anterior no tempo.

De acordo com a ideia de Gödel, todo o universo está em rotação em relação a eixos locais, tornando possível viajar ao redor do universo e voltar antes de ter partido. Para que isso ocorresse, seria preciso encontrar um local onde o universo estivesse girando, de forma que se pudesse viajar no sentido oposto da rotação com uma velocidade bem próxima ou maior que a da luz. Dessa forma, no modelo de universo de Gödel, as viagens para o passado são permitidas, e não é exclusivamente necessário que se viaje mais rápido do que a luz. No entanto, até os dias atuais, nenhum tipo de rotação foi constatado em nosso universo, tampouco uma forma de provocá-la artificialmente. Logo, a solução de Gödel não se aplica ao nosso universo, ainda que tenha incentivado estudos posteriores sobre a possibilidade de se voltar no tempo (NOVELLO, 1997).

Uma das propostas mais recentes nesse sentido foi apresentada por Richard Gott, da Universidade de Princeton, em 1991. A ideia de Gott é que existiriam cordas cósmicas gigantes (que não são as mesmas da teoria das cordas) que podem ser restos do Big Bang. A existência dessas cordas é uma previsão de algumas teorias de partículas elementares, no entanto, elas ainda não foram observadas na natureza. Richard Gott imaginou que, se alguém viajasse rapidamente ao redor de duas cordas cósmicas em colisão, então, esse alguém voltaria no tempo, devido à deformação espaço-temporal causada pelo colapso dessas cordas cósmicas.

O problema desse modelo é que, para realizar o experimento na prática, seria preciso encontrar essas cordas cósmicas no espaço, ou criar um modo de produzi-las artificialmente, para posteriormente levá-las a colidirem de forma precisa, para que se pudesse gerar o efeito desejado. Ainda assim, porém, o tempo de duração seria muito curto, sem contar a imensa quantidade de energia que seria necessária. Por exemplo, para que se pudesse voltar um ano no tempo, seria utilizada a energia de mais de uma galáxia inteira (GOTT apud KAKU, 2010).

Como mencionado anteriormente, uma viagem para trás no tempo somente seria possível viajando mais rápido do que a luz. Até o momento, foi realizada uma análise de teorias que tentam encontrar uma saída para essa questão, pois, como é postulado, e até então irrevogável, a velocidade da luz é a velocidade limite no nosso universo. Uma das soluções mais promissoras para esse problema seria a existência de um atalho no espaço-tempo, chamado pelos cientistas de “buraco de minhoca”. O buraco de minhoca, como o nome já sugere, seria uma espécie de túnel no espaço-tempo. Percorrendo esses túneis, a distância entre dois pontos seria bem menor do que a distância percorrida pelo espaço comum, de modo que esses buracos no espaço-tempo permitiriam viajar mais rápido do que a luz.

Por analogia, imagina-se uma montanha muito alta e uma pessoa que almeja ir até o seu outro lado, devendo, para isso, percorrer toda a distância até o topo e posteriormente descer na direção desejada. Agora imaginemos que exista um túnel na base da montanha que leve até o outro lado em uma linha quase reta. A distância percorrida pela pessoa até o outro lado seria bem menor do que se ela precisasse subir até o topo para depois descer. Como o espaço-tempo, na teoria da relatividade geral, é curvo e tratado como uma espécie de tecido que pode ser deformado e até perfurado, foi sugerida a existência desses buracos no espaço-tempo. Em 1935, Einstein e Nathan Rosen mostraram que a teoria da relatividade permitia a ocorrência do que chamaram de “pontes”, que ficaram sendo conhecidas como “pontes de Einstein-Rosen” (HAWKING, 2005).

As pontes de Einstein-Rosen, como ficaram conhecidas, mas que hoje são chamadas de “buracos de minhoca”, duravam pouco tempo, ou seja, quando uma nave o atravessasse, logo o buraco de minhoca entraria em colapso, tornando-se um buraco negro. Seria necessário encontrar uma forma de manter o buraco de minhoca aberto tempo suficiente para que um corpo macroscópico pudesse atravessá-lo. A sugestão de alguns físicos seria a utilização da energia negativa (que já foi descrita acima), na medida

em que, teoricamente, essa forma exótica de energia poderia manter um buraco de minhoca estável, tornando-o transponível (HAWKING, 2005).

Segundo a teoria quântica, alguns físicos sugerem a existência de minúsculos buracos de minhoca que aparecem e desaparecem a todo o tempo à nossa volta. No entanto, as dificuldades mencionadas acima permanecem, ou seja, o tempo de duração desses buracos no tecido do espaço-tempo é muito curto, sem contar que o seu tamanho é da escala das partículas subatômicas.

Até aqui, o buraco de minhoca já foi descrito de forma qualitativa. Mas como ele poderia ser utilizado como máquina do tempo? Antes de tudo, deve-se encontrar um buraco de minhoca no universo e, se isso não for possível, deve-se desenvolver um método para gerá-lo artificialmente, provavelmente com um acelerador de partículas extremamente potente. Vamos imaginar que uma civilização avançada consiga realizar qualquer um dos dois feitos. Posteriormente, deve-se encontrar energia negativa ou alguma outra forma de energia que possa manter o buraco de minhoca estável.

Tendo um buraco de minhoca estável, seria possível conectar uma das extremidades do buraco de minhoca à Terra e a outra a uma espaçonave rebocadora. Essa espaçonave rebocaria uma das extremidades do buraco de minhoca até uma longa distância, movendo-se com uma velocidade próxima à da luz, enquanto a outra extremidade ficaria presa à Terra. Tendo em vista o efeito da dilatação temporal, o tempo na extremidade que presa à espaçonave passaria mais lentamente do que o tempo na extremidade presa à Terra. Posteriormente a espaçonave pousaria na Terra carregando consigo a extremidade do buraco de minhoca.

Devido à dilatação temporal, quando a espaçonave pousasse na Terra, carregando uma das extremidades do buraco de minhoca, já teriam se passado vários anos a mais no planeta em relação à outra extremidade do buraco de minhoca que permaneceu no planeta Terra. Isso significa que uma extremidade do buraco de minhoca existiria no passado, enquanto a outra existiria no futuro. Sendo assim, qualquer pessoa poderia entrar na extremidade que está no passado e sair no futuro, ou mesmo fazer o caminho inverso e voltar do futuro para o passado. Até os dias atuais, a máquina do tempo com base no buraco de minhoca transponível, segundo a maioria dos físicos, é a proposta mais promissora para tornar possíveis as viagens para o futuro e de volta para o passado. (HAWKING, 2002).

Apesar das possibilidades físicas existentes para se viajar para trás no tempo, é impossível a realização prática dessas viagens com a tecnologia disponível até os dias atuais. O próprio Stephen Hawking, que é uma das referências da atualidade nos estudos que envolvem questões referentes ao tempo e espaço, chega a duvidar que um dia as viagens para o passado se tornem possíveis: “[...] não temos indícios confiáveis de visitantes do futuro” (HAWKING, 2002, p. 142). Hawking argumenta que, se algum dia as viagens para o passado pudessem ser realizadas, então, o nosso cotidiano deveria estar infestado de turistas do futuro. Em contrapartida, o mesmo autor resolve, de certa forma, o problema, sugerindo que, se algum dia for inventada uma máquina que possa voltar no tempo, as viagens poderiam ocorrer apenas até o tempo em que a máquina foi inventada, nunca para um tempo anterior à sua existência.

São inúmeros os paradoxos e problemas filosóficos que surgem quando se considera a possibilidade de voltar no tempo. O mais famoso é chamado de “paradoxo do avô”. Imaginemos que alguém possa voltar no tempo e matar seu próprio avô, antes que este tenha gerado seu pai. Isso impediria seu próprio nascimento. Nesse caso, é coerente realizar a seguinte pergunta: como alguém pode voltar no tempo e matar o avô antes de seu próprio pai ter sido gerado, se, com isso, essa pessoa impede o próprio nascimento? Ou seja, se essa pessoa ainda não nasceu, como pode voltar no tempo e matar o próprio avô para impedir seu próprio nascimento?

Em seu livro *Física do impossível*, Michio Kaku apresenta três soluções possíveis para esse paradoxo. A primeira diz o seguinte: “[...] você não tem livre-arbítrio. Você é forçado a completar o passado como ele foi escrito”. Isso significa que, mesmo que alguém possa voltar no tempo, não poderá modificar a história, ou seja, se você voltou no tempo e fez alguma modificação, é porque isso já estava escrito na história (KAKU, 2010, p. 233). A segunda solução apresentada pelo mesmo autor diz que: “[...] você tem livre-arbítrio, portanto pode mudar o passado, mas dentro de certos limites”. Essa solução implica no fato de você poder modificar o passado, no entanto, quando essa modificação fosse gerar um paradoxo, como, por exemplo, se você fosse matar seu próprio avô, alguma força ou lei física o impediria de fazê-lo (KAKU, 2010, p. 233). A terceira solução apresentada diz que: “[...] o universo se divide em dois”. Essa solução implica na existência de universos paralelos (KAKU, 2010, p. 234). Toda vez que alguém volta ao passado, na verdade, pode fazer o que quiser, pois está em um universo paralelo, vivendo uma história diferente daquela que estaria vivendo se não tivesse voltado no tempo.

Portanto, se você matar seu avô, na realidade, terá matado o seu avô nessa história alternativa, e não naquela em que se encontrava antes de voltar no tempo, ou seja, as duas histórias coexistem: numa você matou seu avô, na outra, não.

A existência de universos paralelos vem sendo estudada atualmente pelos físicos. Nesses estudos, o universo passa a ser chamado de “multiverso”. Existem vários modelos que permitem a existência desses universos paralelos, no entanto, eles ainda não foram detectados experimentalmente. Embora existam teorias teoricamente promissoras, as viagens no tempo para o passado ainda não foram observadas na natureza, e não se tem previsão de que se possa realizá-las em laboratório. Entretanto, não existe uma teoria que afirme a impossibilidade da sua realização. Nesse sentido, esse campo de pesquisa permanece aberto, podendo a qualquer momento dar origem a uma nova teoria que modifique drasticamente o paradigma vigente no meio científico.

## REFERÊNCIAS

- ARISTÓTELES (384-322 a. C.). *Metafísica*. São Paulo: Edipro, 2006.
- BERNSTEIN, Jeremy. *As idéias de Einstein*. São Paulo: Cultrix, 1973.
- EINSTEIN, Albert. *A teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- FRIEDMAN, M. Understanding space-time. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 38, p. 216-225, 2007.
- GÖDEL, K. Uma nota acerca das relações entre a teoria da relatividade e a filosofia idealista. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, p. 521-524, 2006.
- HAWKING, S. W. *Uma nova história do tempo*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.
- HEISENBERG, Werner. *Física e filosofia*. 4. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1999. (Edições Humanidades).
- HOYLE, Fred. *A natureza do universo*. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1962.
- KAKU, Michio. *Física do impossível: uma exploração pelo mundo de phasers, campos de força, teletransporte e viagens no tempo*. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.
- LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MIKINKOWSKI, H., *O principio da relatividade*. Av. de Berna Lisboa. Fundação Clalouste Gulbenkian, 1958.
- MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas. *Explicando a teoria da relatividade*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.
- \_\_\_\_\_. *O livro de ouro do universo*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2002.
- \_\_\_\_\_. Hiroshima e Nagasaki: razões para experimentar a nova arma. *Scientia e Studia*, v. 3, n. 4, p. 683-710, 2005.
- NOVELLO, Mário. *O circulo do tempo: um olhar científico sobre viagens não-convencionais no tempo*. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

Compreendendo a teoria da relatividade:  
dos fundamentos às suas consequências

---

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza. *Astronomia e astrofísica*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

RAY, Christopher. *Tempo, espaço e filosofia*. São Paulo: Papyrus, 1993.

SANTO AGOSTINHO. *Confissões*. São Paulo: Martin Claret, 2004.

SPALDING, Luis Eduardo Schardong. *Força, campo e potencial elétrico*. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014.

UTTNER, J.; RENN, J.; SCHEMMEL, M. Exploring the limits of classical physics: Planck, Einstein, and the structure of a scientific revolution. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 34, p. 37-59, 2003.