AULA

50

Tudo é relativo

PARA COMEÇAR

Maristela estava voltando para casa, de ônibus. Teve um dia cheio de atividades! No caminho, pensava: “Este ônibus está se movendo em relação à rua, assim como eu. Vejo passar árvores, edifícios... Mas este senhor cochilando está sempre ao meu lado... Isso quer dizer que em relação a ele, e ao ônibus, eu estou parada!

O raciocínio continuou: “Isso acontece porque os **movimentos** são sempre descritos a partir de um **referencial**. Então eu posso estar parada e me movendo ao mesmo tempo, dependendo do referencial que eu escolho!

A conclusão da Maristela é correta e significa que o **movimento** de um objeto é **relativo**!

Da mesma forma, quando dizemos que a farmácia fica à direita ou à esquerda da rua, não podemos esquecer de dizer em que sentido percorremos a rua!

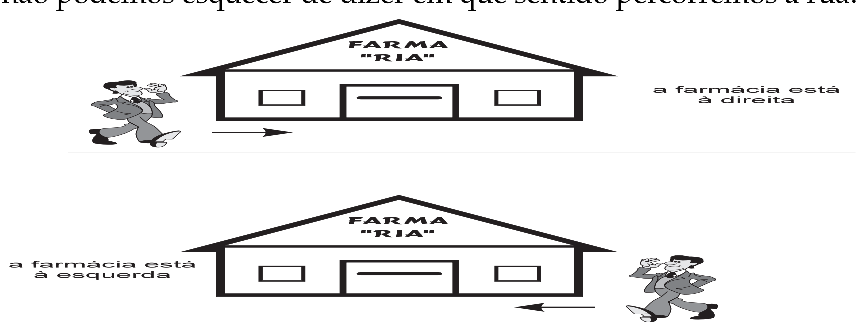


Figura 1. A farmácia está à esquerda ou à direita de acordo com o sentido em que a pessoa caminha.

Ou, ainda: quando alguém nos diz que pagou baratíssimo por uma camisa, esse “baratíssimo” pode ser caro para nós, porque vai depender do salário de cada um!

Esses são alguns exemplos de **relatividade** aos quais estamos acostumados no nosso dia-a-dia. Relatividade das posições, das velocidades, dos preços...

Nesta aula você vai aprofundar seus conhecimentos sobre relatividade. Vai estudar a **teoria da relatividade** proposta por **Albert Einstein** no início deste século. É importante saber que as previsões dessa teoria têm sido observadas em muitos experimentos, o que a torna um dos grandes sucessos da física nos últimos tempos.

A relatividade dos movimentos

Vamos voltar ao caso do ônibus: você está sentado num ônibus que passa por uma rua. Assim como o ônibus, você também está em movimento em relação à rua, mas está parado em relação ao motorista. Poderíamos dar outra interpretação à mesma situação, dizendo que você e o motorista estão parados e que são as árvores e as casas que se movem para trás! As duas interpretações são possíveis e ambas estão corretas.

Isso reforça a afirmação de que, ao estudarmos um movimento, precisamos sempre definir qual o referencial escolhido. E quais são as conseqüências da **relatividade dos movimentos**?

Fique ligado

Imagine que você está andando dentro do ônibus com uma velocidade (v_p) constante de 1 m/s em relação ao ônibus, que está parado no ponto. Portanto, você se move com 1 m/s em relação ao ônibus e **também** em relação ao ponto.

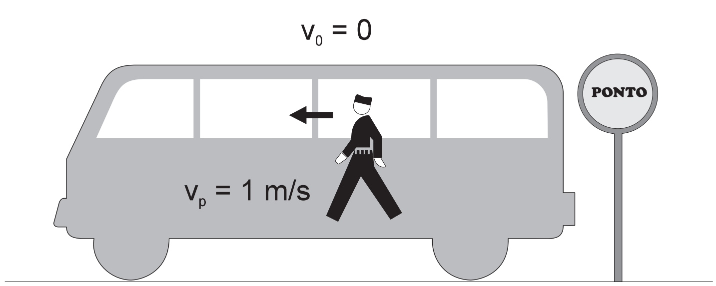


Figura 2. Ônibus parado e passageiro caminhando.

Agora imagine que o ônibus se afasta do ponto **em linha reta** e com velocidade constante (v_o) de 10 m/s. Você continua caminhando dentro do ônibus com a mesma velocidade de 1 m/s. A pergunta é: qual será a sua **velocidade em relação ao ponto**?

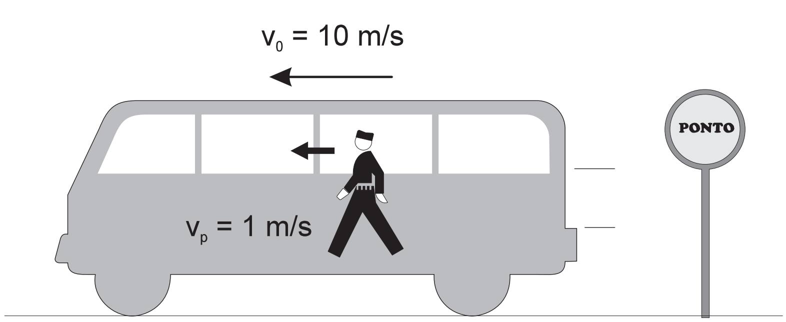


Figura 3. Passageiro e ônibus se movendo.

Lembre-se de que **a velocidade é uma grandeza vetorial**. Por isso a sua velocidade em relação ao ponto será dada pela **soma vetorial** das duas velocidades.

Se você caminhar no mesmo sentido do movimento do ônibus (como indica a Figura 3), sua velocidade em relação ao ponto será de 11 m/s e você vai se afastar mais rápido do ponto. Caso seu movimento tenha sentido contrário ao sentido do ônibus, sua velocidade em relação ao ponto será de apenas 9 m/s! Observe os esquemas mostrados nas Figuras 4a e 4b.

Figura 4a

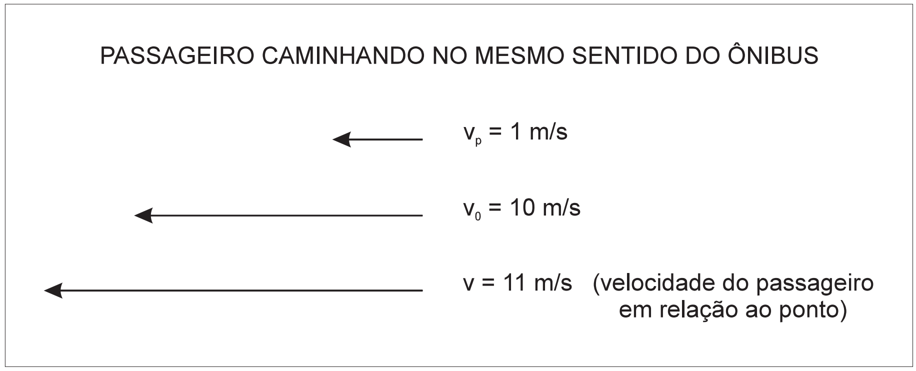
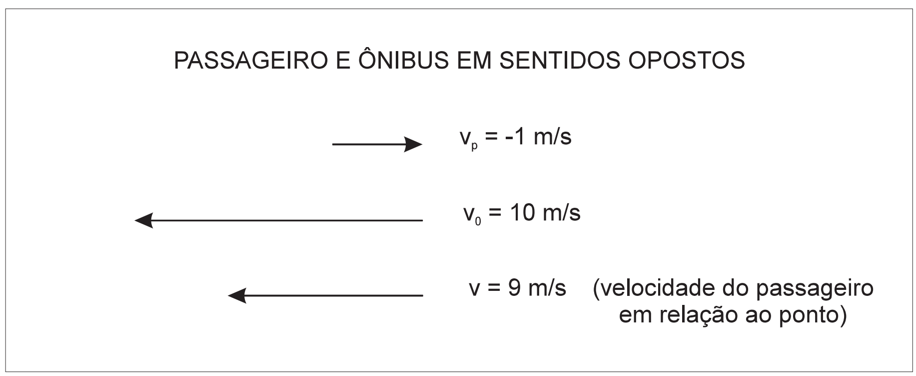
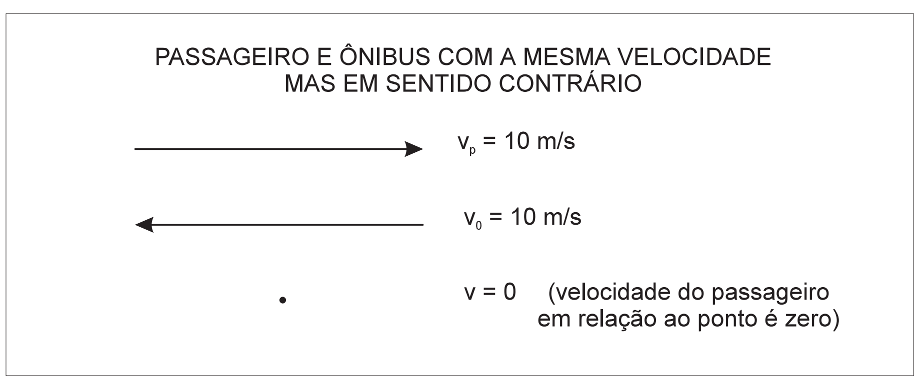


Figura 4b



Se você pudesse andar com a mesma velocidade do ônibus, mas em sentido contrário, você não sairia do lugar! (Figura 5)

Figura 5



Esta é a regra para somar velocidades em referenciais que se movem numa mesma direção.

Agora, imagine que todas as janelas do ônibus foram vedadas e que a estrada é **perfeitamente plana e lisa**, de modo que o ônibus anda em **movimento retilíneo uniforme** (MRU), sem nenhuma vibração. Nessas condições, você não é capaz de afirmar que o ônibus está em movimento. Isso acontece porque não aparece nenhuma força e não existe nenhuma experiência que indique que o ônibus está em movimento retilíneo uniforme: tudo se passa como se ele estivesse parado!

Se o ônibus acelerar, você sentirá uma pressão do seu banco sobre você. Isso acontece porque o banco irá exercer uma força sobre você para acelerá-lo também. Se o ônibus frear bruscamente, você será jogado para a frente e precisará se segurar para não cair. Se o ônibus fizer uma curva, você será jogado para o lado! Mas, se o ônibus permanecer em MRU, você não vai sentir nenhuma força e nem vai perceber que está em movimento!

Movimentos retilíneos uniformes a velocidades de 10 km/h, 30 km/h, 80 km/h etc. são todos equivalentes entre si: sem olhar para fora do ônibus (nem para o velocímetro), é impossível saber a velocidade do ônibus ou se ele está parado!

Já sabemos de que modo compor velocidades como as do passageiro e do ônibus. No início deste século, o jovem cientista Albert Einstein vivia atormentado com uma dúvida: será que para a luz vale o mesmo raciocínio?

O estranho comportamento da luz

À noite, quando entramos em casa e acendemos a luz, não precisamos esperar para enxergar, pois o ambiente fica imediatamente iluminado: a luz parece se propagar instantaneamente, isto é, com uma velocidade infinita! Mas, na realidade, a velocidade da luz tem um valor definido e **muito grande**! Atualmente a velocidade da luz é medida com muita precisão: seu valor no vácuo é c=299.792.458 m/s, ou seja, aproximadamente 300.000 km/s (trezentos mil quilômetros por segundo)!

Nas Aulas 35 e 49 você estudou a natureza da luz. Viu que a luz tem natureza dupla: ela se comporta ora como partícula, ora como onda. Ondas mecânicas (como o som) precisam de um meio material (como o ar) para se propagar. No século passado, muitos cientistas acreditavam que a luz era uma onda que se propagava num meio material ao qual deram o nome de **éter**. O éter seria invisível, sem peso, e estaria presente em todo o espaço.

Surgiu então uma questão: o que acontece quando uma fonte de luz (por exemplo, uma lâmpada) está em movimento em relação ao éter? A velocidade da luz é alterada? Em outras palavras: a regra de composição de velocidades, que discutimos no caso do ônibus, continua válida no caso da luz?

No seu movimento em torno do Sol, a Terra tem velocidade de 30 km/s. Um feixe de luz que se aproxima a 300.000 km/s, vindo de frente, deve ter uma velocidade de 300.030 km/s em relação à Terra, como indica a figura abaixo:

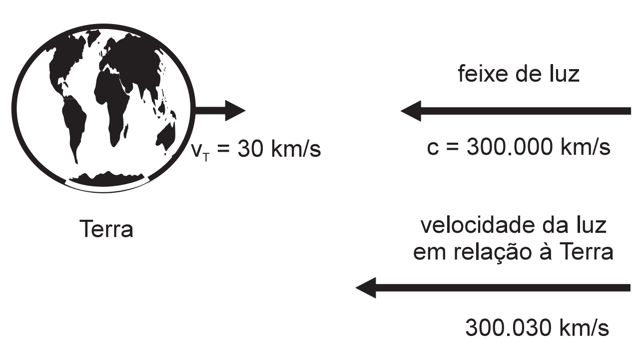


Figura 6. Terra e feixe de luz em sentidos contrários.

Se esse feixe se aproxima vindo de trás da Terra, ou seja, no mesmo sentido do seu movimento, deve ter uma velocidade em relação à Terra de "apenas" 299.970 km/s!

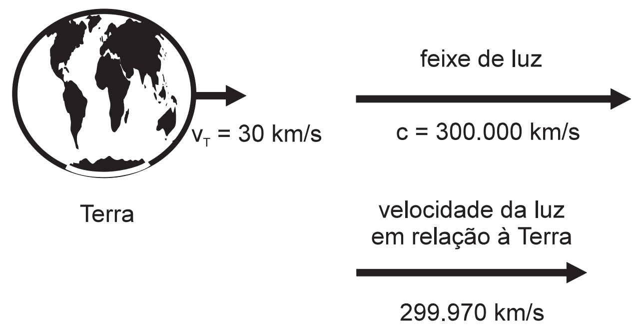


Figura 7. Terra e feixe de luz no mesmo sentido.

Entretanto, as experiências mostram que **nos dois casos a velocidade da luz é a mesma**, como se a Terra não estivesse em movimento. Portanto, a teoria do éter não consegue explicar os resultados das experiências sobre a velocidade da luz. Assim, Einstein abandonou a idéia do éter e admitiu que:

A luz se propaga sem necessidade de um meio material e sempre com a mesma velocidade, independente do referencial.

Esse fato tem conseqüências profundas sobre as nossas idéias de espaço e de tempo. Vejamos quais são elas.

O tempo é relativo!

Desde a época de Isaac Newton, no século XVII, acreditava-se que o tempo era absoluto e fluía uniformemente. Mas, se o tempo fosse absoluto, a regra de composição de velocidades deveria valer sempre, inclusive no caso da luz. O fato de a velocidade da luz num meio ser sempre a mesma, independente do referencial, implica que o tempo não pode ser absoluto.

Esta é talvez a conseqüência mais surpreendente: o **tempo não é absoluto**, isto é, não é o mesmo em todos os referencias. Isso significa que o ritmo de um relógio não é o mesmo se ele estiver parado ou em movimento!

Vamos ver um experimento que comprova esse fato e, em seguida, vamos demostrar, com a ajuda da matemática, que o tempo passa de forma diferente quando medido em dois referenciais em movimento, um em relação ao outro.

O **múon** é uma partícula produzida pelos raios cósmicos na atmosfera da Terra e que tem um tempo de vida muito curto. Um múon em repouso dura apenas cerca de 2 microssegundos depois de ter sido criado. Um microssegundo é um milhonésimo (1/1.000.000) de segundo.

Um múon produzido no alto da atmosfera, a 10 km de altitude, viajando a uma velocidade próxima à da luz (300.00 km/s), não poderia ser observado na superfície da Terra, pois precisa de aproximadamente 30 microssegundos para atingir a superfície (Figura 8). Entretanto, ele é observado!

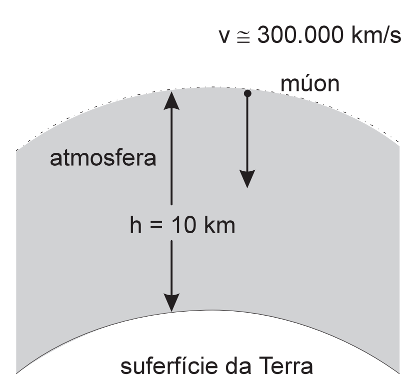


Figura 8

Como isso pode ser explicado? De acordo com a teoria da relatividade, **o tempo passa mais devagar para um objeto em movimento**. É o caso do múon: para essa partícula, que está com grande velocidade, passaram-se menos de 2 microssegundos. Mas, para nós, que estamos parados, esse tempo é da ordem de 30 microssegundos. Quer dizer, para o múon, o tempo passou mais lentamente.

Esse fenômeno é conhecido como **dilatação do tempo**. Entretanto, esse efeito só é percebido quando as velocidades são próximas à velocidade da luz, o que pode ocorrer no caso de algumas partículas subnucleares. No nosso dia-a-dia, as velocidades são no máximo da ordem de 10 km/s (por exemplo, a dos foguetes) e, nesses casos, os efeitos de dilatação do tempo não são percebidos.

Para entender melhor a dilatação do tempo, vamos imaginar a seguinte situação: você está num "foguete relativístico", um foguete capaz de andar com uma velocidade (v) muito grande, próxima à da luz. Você está dentro do foguete e acende uma lanterna que está no chão do foguete (ponto A da Figura 9). A luz vai até o teto, encontra um espelho (B), é refletida e volta, pelo mesmo caminho, ao ponto de partida (A). Vamos supor que a luz percorre uma distância 2h.

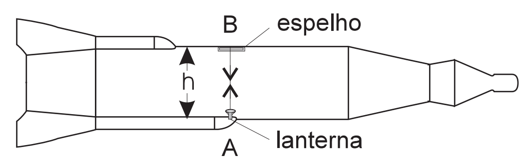


Figura 9. Caminho da luz visto de dentro do foguete.

A velocidade da luz é **c** e t_0 é o tempo medido para a luz ir e voltar. Assim, podemos escrever:

$$\boxed{c = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo}} \Rightarrow c = \frac{2h}{t_0} \Rightarrow h = \frac{c \cdot t_0}{2}} \quad (1)$$

Imagine que um colega está na base de lançamento observando o seu movimento. Para ele, a luz percorreu um caminho diferente, pois o foguete está se movendo. Observe a figura abaixo, que mostra o foguete em três posições diferentes:

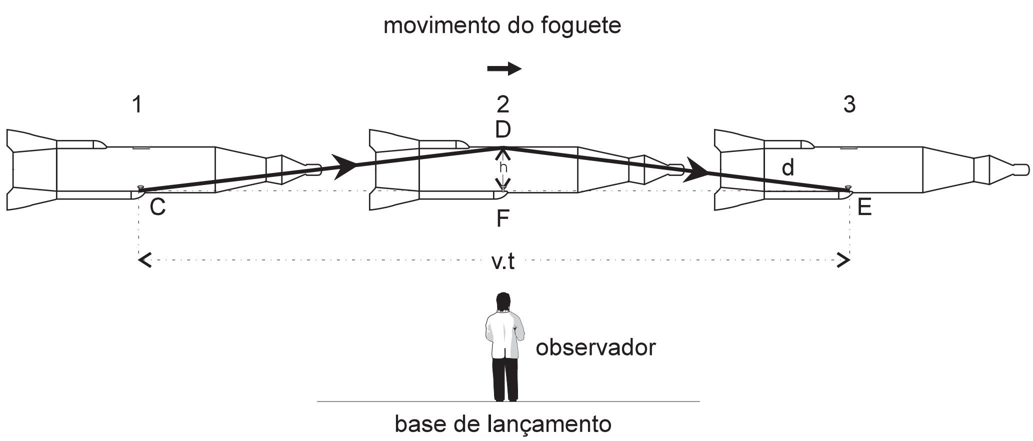


Figura 10. Caminho da luz visto da base.

Para o seu colega, a luz percorreu o caminho 2d, que pode se calculado utilizando-se o triângulo CDE da Figura 10. Observe que, enquanto a luz vai de C até E, passando por D, o foguete vai da posição 1 até a posição 3, percorrendo a distância dada por CE. O tempo que eles gastam para isso será chamado de t.

Como a velocidade do foguete é v, a distância percorrida por ele no tempo t é EC = v · t. Para a luz, já que sua velocidade é constante, podemos escrever:

$$c = \frac{2d}{t} \Rightarrow d = \frac{c \cdot t}{2} \qquad (2)$$

Para mostrar que os tempos são diferentes quando medidos em referenciais diferentes, precisamos verificar qual a relação entre t e t_0. Para isso, vamos encontrar a relação entre h e d, que pode ser feito utilizando o teorema de Pitágoras no triângulo retângulo DEF, indicado na Figura 10, cujos lados são: h (DF), d (DE) e v · t/2 (EF). Assim, teremos:

$$d^2 = h^2 + \frac{v^2 \cdot t^2}{4} \qquad (3)$$

Agora substituímos o h e d dados pelas equações (1) e (2) na equação (3), e chegamos a:

$$\frac{c^2 \cdot t^2}{4} = \frac{c^2 \cdot t_0^2}{4} + \frac{v^2 \cdot t^2}{4}$$

que é uma equação do segundo grau. Queremos escrever o t como função das outras grandezas. Para isso, seguiremos alguns passos: multiplicamos por 4 os dois lados da equação e passamos as outras grandezas para o outro lado.

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

Assim, extraindo a raiz quadrada, chegaremos ao que queríamos: a relação entre os tempos medidos nos dois referenciais, no foguete (t_0) e na base de lançamento (t):

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (4)$$

O termo que está no denominador é **sempre menor do que um**, pois é raiz de 1 menos um termo positivo. Então, t é igual t_0 dividido por um número menor do que 1, portanto **t é sempre maior do que t_0**.

$$t > t_0$$

Isso mostra que, para o observador em movimento no foguete, **o tempo passa mais lentamente...**

Note também que o número no denominador não pode ser zero. Portanto, a velocidade do foguete (v) **não pode ser igual** à velocidade da luz (c). Além disso, o número do qual extraímos a raiz quadrada deve ser positivo, portanto:

$$1 - \frac{v^2}{c^2} > 0 \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} < 1 \Rightarrow v^2 < c^2 \Rightarrow v < c$$

Isso demonstra a afirmação de Einstein segundo a qual **nenhum objeto pode viajar a uma velocidade igual ou maior do que a velocidade da luz (c)**. A velocidade da luz é um limite de velocidade que nenhum objeto pode ultrapassar.

Veja este exemplo: imagine que o foguete viaja com 80% da velocidade da luz, **c**, isto é, v=0,8c. Substituindo o valor de v na equação (4), teremos $t = t_0/0,6 \cong 1,67\ t_0$, ou seja, enquanto para você passou 1 minuto, para o seu colega na base passou 1,67 · 1 minuto, que é aproximadamente 1 minuto e 40 segundos! Isso significa que o relógio do foguete andou mais devagar!

Observe que, se velocidade **v for muito menor do que c**, a razão v/c será muito pequena. Por exemplo: suponha um foguete, dos que existem hoje, andando à velocidade de 10 km/s. A razão v/c será 10/300.000 = 0.000033, muito pequena. Nesse caso, t e t_0 são praticamente iguais. Isso está de acordo com previsões da física de Newton: o ritmo dos relógios não varia quando as **velocidades são muito menores do que c**.

Isso mostra que a teoria da relatividade não contradiz a física clássica: as leis de Newton continuam válidas nos casos em que as velocidades são muito menores que a da luz, como ocorre no nosso dia-a-dia. A teoria da relatividade traz novos fenômenos observados apenas quando as **velocidades são próximas à da luz**.

O comprimento é relativo!

O comprimento de um objeto também depende do referencial! Quer dizer, para o seu colega, que está sentado na base, o foguete em movimento tem um comprimento menor do que quando está parado na base!

Imagine que o foguete tem um comprimento L_0 quando está parado na base. Quando estiver se movendo com uma velocidade v, o observador na base verá o foguete com um comprimento (L) dado por:

$$\boxed{L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (5)$$

Não vamos aqui deduzir esta expressão matemática, vamos discutir o seu significado. Ela se parece com a equação (4) para os tempos: tem o mesmo fator

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

(que é sempre menor do que 1), mas agora ele está multiplicando L_0, portanto:

$$\boxed{L_0 > L}$$

Quer dizer: o comprimento do foguete quando está em repouso é maior do que quando ele está em movimento. Esse fenômeno é conhecido como **contração do espaço**.

Passo a passo

Voltando ao exemplo onde a velocidade do foguete era v = 0,8c. Substituindo o valor na equação (5) e fazendo os cálculos, teremos $L \cong 0{,}6\ L_0$, ou seja, o seu colega verá o foguete com quase metade do comprimento L_0 que o foguete tem quando está parado. Suponha que o foguete tenha 50 metros quando medido por você, que está dentro dele. Visto pelo seu colega que está na base, o foguete em movimento terá apenas 30 metros!

Note que só o comprimento do foguete varia, a sua altura não varia: só as dimensões na direção do movimento sofrem contração.

A massa é relativa!

Você já sabe que a massa de um corpo é a medida de sua inércia. De acordo com as leis de Newton, a massa de um corpo é sempre a mesma em qualquer referencial. Entretanto, Einstein mostrou que **a massa de um corpo depende da sua velocidade**. A equação que descreve o comportamento da massa (m) de um objeto em movimento com uma velocidade v, em função da sua massa medida quando ele está em repouso (m_0), é:

$$\boxed{m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}$$

Essa equação mostra que a massa de um objeto aumenta quando ele está em movimento.

$$\boxed{m > m_0}$$

Se a velocidade do foguete for v = 0,8c, sua massa será $m = m_0/0{,}6 \cong 1{,}67\ m_0$. Supondo que a massa do foguete seja 10 toneladas, passará a 16,7 toneladas!

$E = m \cdot a^2$, $E = m \cdot b^2$, $E = m \cdot c^2$...

$E = m \cdot c^2$. Obviamente não foi trocando as letras a, b e c que Einstein deduziu esta equação! Para chegar a ela, Einstein fez cálculos que fogem aos objetivos deste Telecurso: para nós, o importante é discutir o seu significado.

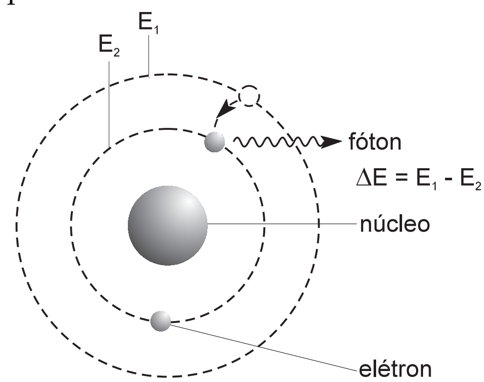
De acordo com a mecânica proposta por Newton, massa e energia são grandezas independentes. Einstein mostrou que massa e energia são equivalentes! Quando aumenta a energia (cinética e potencial) de um corpo, a sua massa também aumenta! A relação entre a energia total (E) de um corpo e a sua massa (m) é dada por:

$$\boxed{E = m \cdot c^2}$$

a famosa equação de Einstein, onde c é a velocidade da luz.

Um exemplo de aplicação dessa equação ocorre na transição que ocorre num átomo, quando um dos seus elétrons vai de um estado de energia E_1 para outro de energia E_2, sendo emitido um fóton com energia $\Delta E = E_1 - E_2$. Nesse caso, a sua massa também varia de uma quantidade $\Delta m = m_1 - m_2$, de tal modo que essas duas quantidades estão relacionadas por:

$$\boxed{\Delta E = \Delta m \cdot c^2}$$



Como a velocidade da luz (c) é muito grande e o seu quadrado (c^2) é maior ainda, a variação de energia (ΔE) é grande mesmo quando a variação de massa (Δm) for pequena.

As transições que ocorrem num átomo, quando um elétron muda de órbita, produzem pequenas variações de energia (emissão de fótons de luz) e a variação de massa é pequena demais para ser percebida. Entretanto, transições que ocorrem **dentro do núcleo atômico** liberam muito mais energia, e a variação de massa, embora pequena, pode ser medida. A aplicação mais famosa da equação $\mathbf{E = mc^2}$ são as bombas nucleares desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial. Elas conseguem grande quantidade de energia, que vem do núcleo atômico.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- a **velocidade da luz** num meio tem sempre o **mesmo valor**, independendo do referencial;
- assim como as posições e as velocidades, o **tempo é relativo**;
- os intervalos de tempo medidos em referenciais que se movem são menores, isto é, o tempo flui **mais** lentamente. Esse fenômeno é chamado de **dilatação do tempo**;
- o comprimento de um objeto medido num referencial em movimento é menor do que o comprimento do objeto medido num referencial em repouso. Esse fenômeno é chamado de **contração do espaço**;
- a contração do espaço e a dilatação do tempo só são percebidas quando as velocidades são próximas à velocidade da luz;
- **massa e energia** são dois aspectos da mesma grandeza e se relacionam pela equação $\mathbf{E = mc^2}$.

Exercício 1

Complete:

Você está sentado assistindo a uma teleaula. Está em **(a)** .... em relação ao aparelho de TV, mas em relação ao Sol você está em **(b)** .... Isso mostra que os movimentos são **(c)** .... , e que todo movimento deve ser descrito a partir de um **(d)** ....

Exercício 2

Complete:

Quando a luz interage com a matéria, ela se comporta como uma **(a)** .... Entretanto, quando a luz se propaga, ela tem características de **(b)** .... A luz pode se propagar mesmo na **(c)** .... de matéria: isso a diferencia das ondas **(d)** .... A luz se propaga no vácuo com velocidade **(e)** .... de 300.000 km/s, independentemente do **(f)** ....

Exercício 3

Complete:

Uma das conseqüências do fato de a velocidade da luz ser constante é que o tempo deixou de ser **(a)** .... Isso quer dizer que o ritmo de um relógio depende do **(b)** .... Quanto mais rápido um objeto se desloca, mais **(c)** .... o tempo passa. Esse fenômeno é conhecido como **(d)** .... do tempo.

Exercício 4

Complete:

Uma outra conseqüência da teoria da relatividade é conhecida como **(a)** .... do espaço. Isso quer dizer que as dimensões de um objeto **(b)** .... quando ele está em movimento. Ainda de acordo com essa teoria, a massa dos objetos também é **(c)** .... , e existe uma equivalência entre massa e **(d)** .... que pode ser expressa matematicamente por **(e)** ....