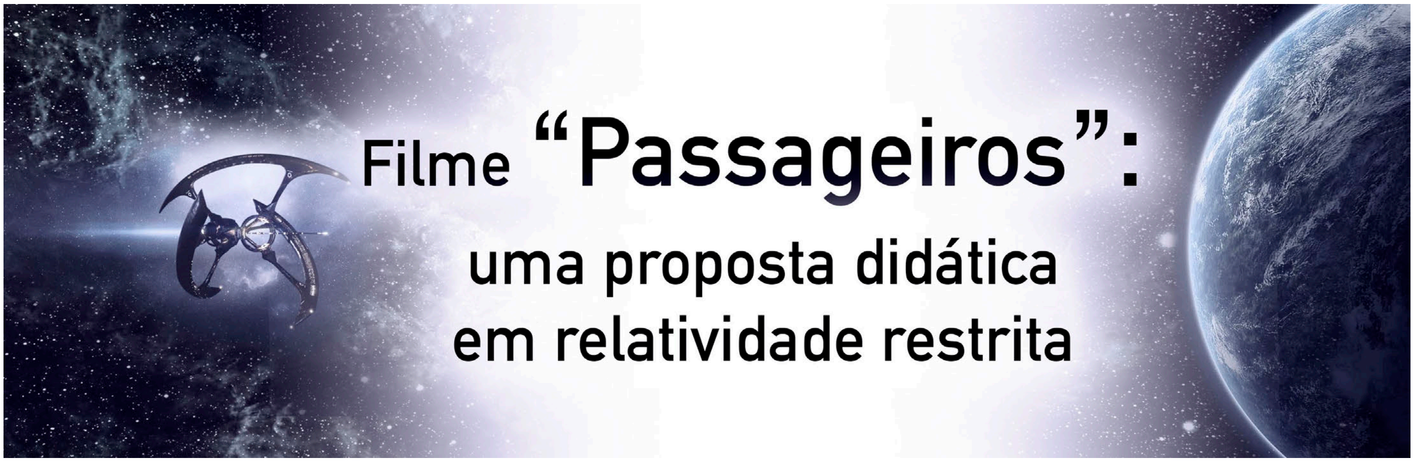

Milton Schivani[1,3,#]
Luanna Karen de Souza[2]
Maria Romênia da Silva[3]
[1]Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
[2]Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São Paulo, SP, Brasil.
[3]Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

RESUMO

O cinema é uma manifestação cultural e pode ser utilizado em sala de aula como um gerador de debates. Cenas de filmes populares podem promover a abordagem de conhecimentos científicos, estimulando o interesse e a curiosidade dos estudantes. No âmbito da física, por exemplo, o filme de ficção científica Passageiros *aborda no enredo problemas característicos da teoria da relatividade restrita. Assim, questões sobre dilatação temporal, contração espacial e viagem interestelar são investigadas neste artigo. Trata-se de uma proposta didática com potencial de abordagem em sala de aula do Ensino Médio ou do ensino superior. Aspectos conceituais e deduções matemáticas simples são apresentados como forma de fundamentar a teoria da relatividade e servir de base para os cálculos efetuados.*

Palavras-chave: relatividade restrita; filmes de ficção científica; viagem interestelar; ensino de física

[#]Autor de correspondência. E-mail: schivani@fisica.ufrn.br.

1. Introdução

O cinema é uma manifestação cultural que pode auxiliar no processo de ensino-aprendizagem em diferentes campos do saber. Como bem destacam Efthiminou e Llewellyn [1], "usar cenas de filmes populares para ilustrar princípios físicos tem estimulado o interesse e promovido um melhor desempenho dos estudantes" (Tradução livre). No filme *Passageiros* (2016) [2], por exemplo, uma nave interestelar chamada Avalon transporta 5 mil passageiros e 258 tripulantes para um planeta colônia denominado Homestead II, quarto planeta do sistema Bhakti. Partindo do planeta Terra até Homestead II, a viagem leva cerca de 120 anos para quem está a bordo da Avalon. Nesse período, todos os passageiros e tripulantes são mantidos em animação suspensa, despertando apenas 4 meses antes de chegarem ao destino. Entretanto, uma falha mecânica desperta um dos passageiros – o engenheiro mecânico Jim Preston (Chris Pratt) – antes do previsto.

Desperto, Jim começa a procurar informações e descobre que foi o único que saiu do estado de animação suspensa. Ele havia acordado 90 anos, 3 meses e 1 dia antes do programado. Para os membros da Avalon, desde que partiram da Terra, havia se passado cerca de 30 anos. Procurando por ajuda, Jim envia uma mensagem com pedido de socorro para a central de atendimento ao consumidor da Companhia Homestead, na Terra.

A mensagem é enviada através de um sistema de sinal a laser. Todavia, a resposta ao pedido de socorro não é instantânea (Fig. 1). Para Jim, será necessário esperar 19 anos para que o sinal (que se desloca à velocidade da luz) chegue até a Terra e mais 36 anos para que a resposta chegue até a espaçonave, um total estimado de 55 anos considerando que a resposta ao pedido de socorro seja imediata.

De acordo com o filme, a espaçonave alcança uma velocidade na ordem de 0,5c, metade da velocidade da luz. Viajantes que se deslocam com velocidades nessa ordem de grandeza já sofrem efeitos relativísticos consideráveis [3, 4].

Narrativas ficcionais como essas apresentam rico potencial didático para promover o ensino de física [5, 6]. Assim, este artigo tem como principal objetivo promover o ensino de relatividade restrita no Ensino Médio ou na graduação a partir da obra cinematográfica *Passageiros*. Para isso, parte-se de algumas questões que podem ser investigadas em aulas de física. Por exemplo:

Usar cenas de filmes populares para ilustrar princípios físicos tem estimulado o interesse e promovido um melhor desempenho dos estudantes

1. Em um contexto de viagem interestelar e situação de emergência similar ao apresentado em *Passageiros*, considerando também a espaçonave em deslocamento linear (Fig. 1) e com velocidade constante de 0,5c, quanto tempo se passaria para um referencial em repouso no planeta Terra no período de: a) 55 anos, registrados pelo passageiro na Avalon entre o envio e o recebimento da mensagem interestelar?; b) 120 anos, registrados pelos passageiros na Avalon em uma viagem normal

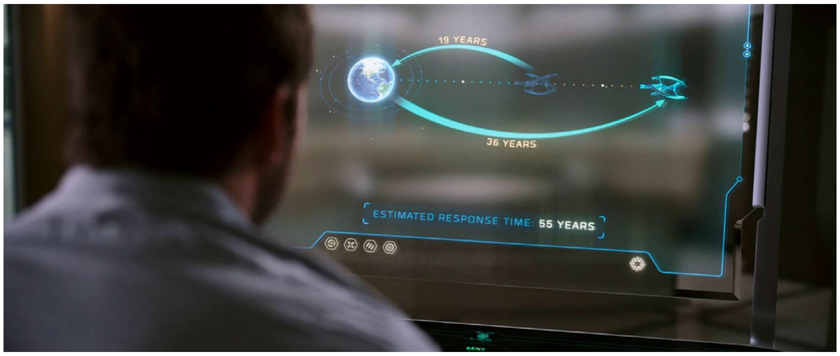

Figura 1 - Cena do filme *Passageiros*, quando o computador da nave informa o tempo de resposta ao pedido de socorro. Créditos: Sony Pictures. Copyright 2016 Columbia Pictures Industries, Inc. All Rights Reserved.

de ida da Terra até Homestead II?

2. Para um referencial na Terra (desprezando o movimento de translação da Terra ao redor do Sol), qual seria a distância até a espaçonave considerando o percurso do sinal em resposta ao pedido de socorro?
3. Sabendo que a mensagem interestelar se desloca na velocidade da luz, seria possível determinar a velocidade média da espaçonave no intervalo de tempo registrado pelo passageiro entre o envio e o recebimento da mensagem?

Essas questões serão investigadas e resolvidas nas seções seguintes. Para isso, serão apresentados inicialmente os principais fundamentos matemáticos e conceituais da teoria da relatividade restrita. A expressão geral para a *dilatação temporal* será deduzida matematicamente com base nos postulados da teoria da relatividade restrita e com base na análise do movimento de um "relógio de luz" medido por dois sistemas de referência. Essa abordagem é a mais comum na maioria dos livros de física e a consideramos mais didática, principalmente para o Ensino Médio.

2. Relatividade restrita: fundamentos teóricos

Partindo dos dois postulados da teoria da relatividade restrita, temos que:

1. Todas as leis da física são iguais em relação a qualquer referencial inercial;
2. A velocidade de propagação da luz no espaço livre tem o mesmo valor em relação a todos os *referenciais inerciais*, não importando o movimento da fonte ou do referencial.

Considera-se como referencial inercial aquele em que uma partícula isolada idealizada – na qual a resultante das forças externas exercida sobre ela é nula – permanece em repouso ou se move linearmente com velocidade constante. Qualquer referencial que se mova com velocidade constante em relação a um referencial inercial também constitui, por sua vez, um referencial inercial.

Esses dois postulados implicam que a ideia clássica de tempo e espaço como independentes deve ser abandonada.

2.1. Dilatação temporal

A expressão que descreve a dilatação temporal pode ser obtida ao analisar o movimento de um *flash* em um "relógio de luz" registrado em sistemas de referência diferentes no espaço-tempo, Fig. 2.

Para um referencial fixo no "relógio de luz" (S'), o tempo decorrido para o *flash* se mover entre os espelhos é registrado como sendo $\Delta t'$ (*intervalo de tempo próprio*) e percorre uma distância dada pelo produto $c\Delta t'$.

Por sua vez, para o sistema de referência S em relação ao qual o "relógio de luz" se move horizontalmente com uma rapidez v, o *flash* leva um intervalo de tempo Δt (*intervalo de tempo relativo*) e percorre um caminho entre os espelhos dado pelo produto $c\Delta t$ (Fig. 2b).

Aplicando o teorema de Pitágoras no triângulo retângulo formado pelas distâncias $c\Delta t$, $c\Delta t'$ e $v\Delta t$, determina-se a relação entre o intervalo de tempo relativo (medido no referencial S) e o próprio (medido no referencial S'), confor-

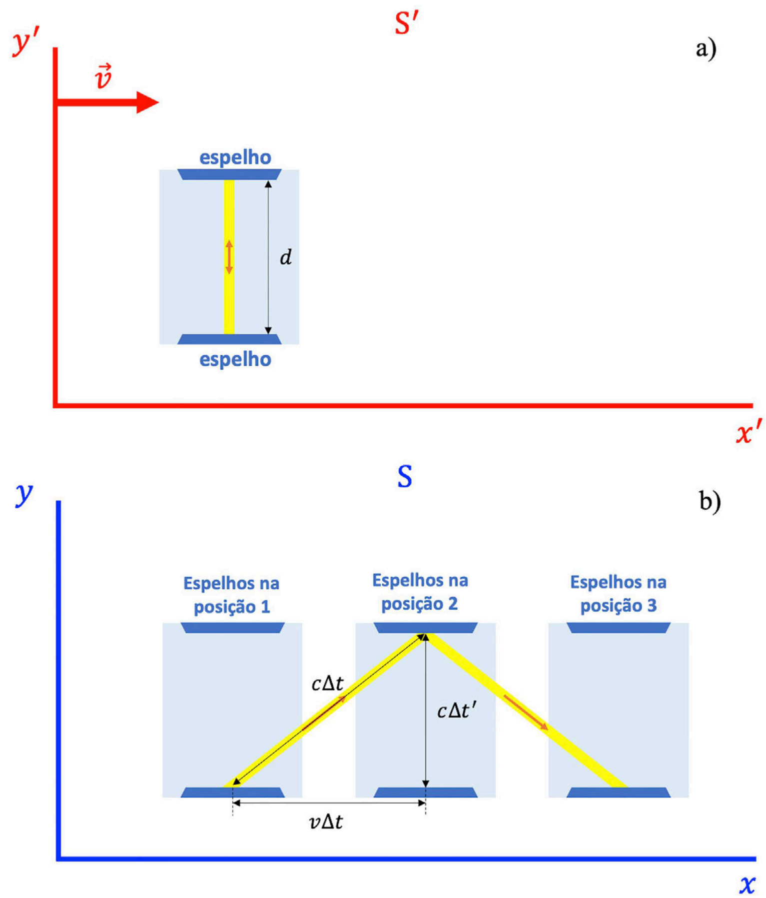

Figura 2 - a) *Flash* luminoso refletido por espelhos paralelos em um "relógio de luz" e observado pelo referencial inercial S' que se movimenta com velocidade v junto ao relógio. b) Movimento horizontal do *flash* luminoso observado pelo referencial S que está parado em relação ao referencial S'.

me descrito pela Eq. (1).

$$(c\Delta t)^2 = (c\Delta t')^2 + (v\Delta t)^2,$$
$$\Delta t^2\left[1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)\right] = \Delta t'^2,$$
$$\Delta t^2 = \frac{\Delta t'^2}{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)},$$
$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}. \tag{1}$$

A quantidade $1/\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$ conhecida como *fator de Lorentz* e é representada pela variável γ (gama), além de assumir valores sempre maiores que 1 quando $v > 0$. Reescrevendo a Eq. (1), temos que

$$\Delta t = \gamma \Delta t'.$$

Observa-se, portanto, que o tempo medido para um referencial em relação ao qual o "relógio de luz" se move horizontalmente com uma rapidez v será maior que o tempo próprio medido para um referencial fixo no relógio. Cabe destacar, ainda, que a equação de dilatação do tempo, assim como a de contração espacial (próxima seção), "não descrevem 'o que vemos', descrevem apenas um procedimento de medição específico ("o que medimos") [7]".

2.2. Contração espacial

No contexto da relatividade restrita, a distância medida entre dois pontos também depende do referencial. Suponha que o "relógio de luz", idealizado anteriormente, seja fixado dentro de uma espaçonave que percorre com velocidade constante v a distância entre duas estrelas. A distância entre as estrelas é medida como sendo L para um referencial S, em repouso em relação ao "relógio de luz" (referencial S'). Essa distância é denominada de espaço próprio. Todavia, qualquer um que esteja no mesmo referencial S' irá observar o "relógio de luz" em repouso. Para o referencial S', a estrela de destino se aproxima da nave com velocidade v e em um intervalo de tempo $\Delta t'$, tempo próprio. Por sua vez, para o referencial S, o "relógio de luz" percorre a distância entre as estrelas, L, em um intervalo de tempo dado por

$$\Delta t = \frac{L}{v}.$$

Devido à dilatação temporal (Eq. (1)), o tempo para o deslocamento da nave entre as duas estrelas registrado pelo referencial S' será menor que o tempo registrado pelo referencial S. Consequentemente, um viajante no referencial S' registra uma distância entre as estrelas L' e conclui ser mais curta que a distância L (registrada pelo referencial S ao longo da direção do movimento). Portanto, podemos descrever a relação entre as distâncias L' e L da forma

$$L' = L\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{L}{\gamma}. \tag{2}$$

Desse modo, como a quantidade $1/\gamma$ é inferior a 1 devido ao fator de Lorentz (para $v > 0$), nota-se que o espaço registrado no referencial S' é menor que o espaço próprio ($L' < L$).

2.3. Coordenadas espaçotemporais

Considere a ocorrência de um evento (fenômeno físico) com coordenadas espaçotemporais registradas por dois observadores nas referências inerciais S e S' como descrito pela Fig. 3.

O observador em S' registra as coordenadas (x', t'), enquanto o observador em S registra (x, t). Em relação ao observador fixo no referencial S, o referencial S' se desloca com velocidade constante v paralelamente aos eixo x e x'. As origens de ambos os referenciais coincidem em $t = t' = 0$.

As transformações de Galileu da relatividade clássica adotam $t = t'$ e descrevem as posições do *evento P* registradas em S e S', desconsiderando a dilação temporal e a contração espacial, ou seja

$$x = x' + vt',$$
$$x' = x - vt,$$
$$y = y',$$
$$z = z'.$$

Transformações que permitam calcular as coordenações espaçotemporais registradas em S e S' devem atender a três condições: *i*) concordar com as *transformações de Galileu* da relatividade clássica quando $v \ll c$, ou seja, para baixas velocidades; *ii*) incluir também o tempo no processo de transformação das coordenadas; *iii*) garantir que o valor da velocidade da luz seja igual em todos os referenciais inerciais.

Para satisfazer às duas primeiras condições, podemos incluir nas expressões da posição x e x' um fator adimensional γ (gama), cujo valor se aproxima de 1 quando a velocidade v se aproxima de zero. Além disso, os tempos registrados em cada referencial, dados por t e t', são distintos. Assim, temos que:

$$x' = \gamma(x - vt), \tag{3}$$
$$x = \gamma(x' + vt'). \tag{4}$$

Para atender à terceira condição, vamos considerar que a luz se propaga com a mesma velocidade c em relação a ambos os referenciais S e S'. Desse modo, a luz proveniente do evento se desloca uma distância dada por $x = ct$, quando registrada no referencial S, e $x = ct'$, quando registrada no referencial S'. Desse modo, as expressões (3) e (4) assumem a forma

$$x' = \gamma(x - vt),$$
$$ct' = \gamma(ct - vt),$$
$$ct' = \gamma t\,(c - v),$$
$$t' = \frac{[\,\gamma t\,(c-v)]}{c},$$
$$t' = \gamma t\left(1-\frac{v}{c}\right), \tag{5}$$

e

$$x = \gamma(x' + vt'),$$
$$ct = \gamma(ct' + vt'),$$
$$ct = \gamma t'(c + v). \tag{6}$$

O fator adimensional γ (gama) pode ser

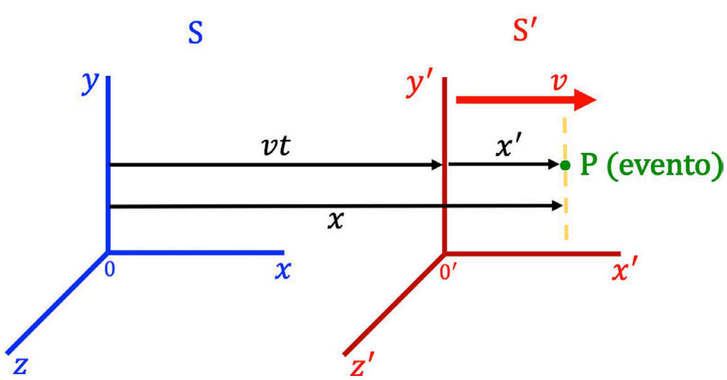

Figura 3 - Coordenadas espaçotemporais de um evento P medidas em relação aos sistemas de referência S e S'. As distâncias perpendiculares ao movimento não são afetadas e o referencial S' está se movendo com velocidade v em relação ao referencial S.

obtido substituindo a expressão para t' (Eq. (5)) na Eq. (6), o que corresponderá ao fator Lorentz, como apresentado anteriormente. A transformação entre t e t' pode ser obtida por meio de um procedimento algébrico correlacionando as Eqs. (3) e (4), finalizando o conjunto de equações que relacionam as coordenadas espaçotemporais de um mesmo evento entre dois referenciais inerciais S e S' de eixos paralelos. Essas equações são conhecidas como *transformações de Lorentz* [4] e estão descritas na Tabela 1 para o caso do movimento ao longo do sentido positivo do *eixo x* e com origens espaciais e temporais comuns inicialmente.

Agora, temos as principais equações e os fundamentos da teoria da relatividade restrita necessários para responder às questões levantadas anteriormente.

3. Cenas de *Passageiros*: análises e resultados

Inspirados nas cenas iniciais do filme *Passageiros* e à luz da relatividade restrita, vamos considerar que a espaçonave se desloca em movimento linear e com velocidade constante durante todo o percurso de envio e retorno da mensagem de socorro (ver Fig. 1). Considera-se também que o serviço de mensagem interestelar se desloca a uma velocidade de aproximadamente 3×10^8 m/s (= $1{,}08 \times 10^9$ km/h) (velocidade da luz no vácuo).

Com relação aos intervalos de tempo para o deslocamento das mensagens, adota-se como o *intervalo de tempo próprio $\Delta t'$* aquele medido no sistema de referência S' que se move com a espaçonave.

Desse modo, resumindo a situação em dois principais eventos (envio e retorno da mensagem) registrados por dois referenciais inerciais distintos (S e S'), é possível construir a seguinte representação gráfica (Fig. 4).

Tabela 1: Coordenadas espaçotemporais de acordo com as *transformações de Lorentz*.

Transformações de Lorentz
$S' \rightarrow S$
$x = \gamma(x' + vt')$
$y = y'$
$z = z'$
$t = \gamma(t' + vx'/c^2)$
$S \rightarrow S'$
$x' = \gamma(x - vt)$
$y' = y$
$z' = z$
$t' = \gamma(t - vx/c^2)$

O *evento 1* representa o exato momento em que o sinal é enviado da espaçonave para a Terra, deslocando-se linearmente à velocidade da luz no vácuo e por uma distância L_i (para um referencial parado na Terra, S). Esse evento é registrado pelo referencial S' nas coordenadas espaço-tempo (x_1', t_1').

Por sua vez, o *evento 2* representa o instante em que o sinal de resposta da Terra é registrado pelo referencial S' nas coordenadas espaço-tempo (x_2', t_2'). Esse sinal percorre uma distância L_f (para o referencial S) e se desloca à velocidade da luz no vácuo.

Entre os eventos 1 e 2, para o referencial S', a espaçonave está parada, ou seja, $x_1' = x_2' = 0$. A diferença das distâncias percorridas pelo laser da mensagem interestelar é dada por ΔL.

3.1. Dilatação temporal e contração espacial

A dilatação temporal para situações como a representada aqui será calculada tendo como base a Eq. (1). Assim, o intervalo de tempo de 55 anos registrado por S' corresponderá ao intervalo de tempo relativo registrado pelo referencial S no valor de

$$\Delta t = \frac{55}{\sqrt{1 - \left(\frac{(0{,}5c)^2}{c^2}\right)}} \cong 63{,}5 \text{ anos}.$$

Sob as mesmas condições, uma viagem de 120 anos corresponderá, aproximadamente, a 138,56 anos quando registrada pelo referencial S.

Por sua vez, a distância entre a espaçonave e o planeta Terra no instante em que a resposta ao pedido de socorro é registrada por S' pode ser calculada aplicando a Eq. (2).

Sabe-se que o sinal da mensagem se desloca à velocidade da luz e que, conforme registrado pelo referencial S', leva 36 anos para chegar até a espaçonave, partindo da Terra. Portanto, no instante em que receber a resposta, a distância entre a espaçonave e a Terra para o referencial S' será de 36 anos-luz. Logo, a distância registrada pelo referencial S corresponderá ao espaço próprio (L) e será dada por

$$L = \frac{36 \text{ anos} - \text{luz}}{\sqrt{1 - \frac{(0{,}5c)^2}{c^2}}} \cong 41{,}57 \text{ anos} - \text{luz}.$$

3.2. Velocidade da espaçonave

Com base no esquema ilustrado pela Fig. 4 e aplicando as transformações de Lorentz para o referencial S (ver Tabela 1), temos que

$$x_1 = \gamma(x_1' + vt_1'), \text{ (Evento 1)}$$
$$x_2 = \gamma(x_2' + vt_2'), \text{ (Evento 2)}$$

Como a espaçonave está parada para o referencial S' $(x_1' = x_2' = 0)$, obtém-se, para o referencial S, a expressão

$$v = \frac{\Delta x}{\gamma(t_2' - t_1')}. \tag{7}$$

Considerando o deslocamento da luz entre os dois eventos ($\Delta L = L_f - L_i$) na perspectiva do referencial S, temos que

$$\Delta L = L_f - L_i = (c\Delta t_2) - (c\Delta t_1).$$

De acordo com a dilatação temporal e por meio das transformações de Lorentz, temos que $\Delta t = \Delta t'$. Assim, a expressão anterior assume a forma

$$\Delta L = c(\gamma\Delta t_2' - \gamma\Delta t_1') = c\gamma(\Delta t_2' - \Delta t_1').$$

Nota-se que $\Delta L = \Delta x$, ou seja, a expressão corresponde exatamente ao mesmo deslocamento sofrido pela espaçonave conforme registrado pelo referencial S.

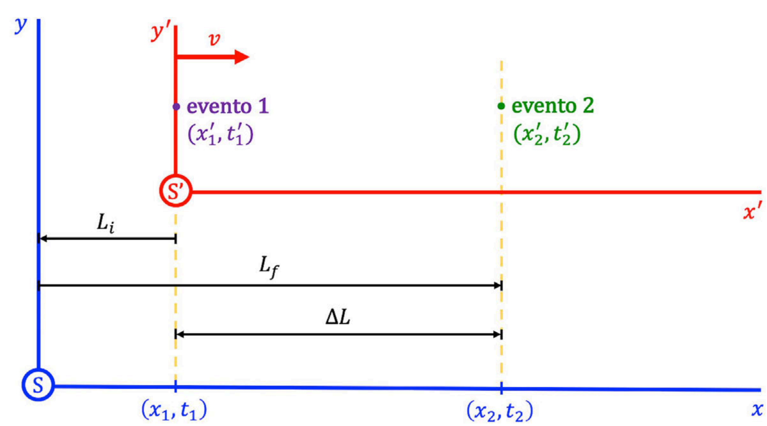

Figura 4 - Representação gráfica dos eventos de envio e de retorno do sinal entre os referenciais S e S'.

Logo, a Eq. (7) resulta em

$$v = \frac{c\gamma(\Delta t'_2 - \Delta t'_1)}{\gamma(t'_2 - t'_1)},$$

$$v = \frac{c(\Delta t'_2 - \Delta t'_1)}{(t'_2 - t'_1)}. \quad (8)$$

O intervalo de tempo $\Delta t'_1$ se refere ao tempo que o sinal de luz leva para chegar até o planeta Terra partindo da espaçonave, ou seja, 19 anos. Já $\Delta t'_2$ é o tempo necessário para o sinal voltar imediatamente da Terra até a espaçonave, 36 anos. O tempo total de ida e volta do sinal registrado pelo referencial S' será dado por $\Delta t' = t'_2 - t'_1 = 55 - 0 = 55$ anos. Substituindo esses dados na Eq. (8), temos que

$$v = \frac{c(36 - 19)}{(55 - 0)} \cong 0,3c.$$

Nota-se que o valor encontrado é inferior ao 0,5c revelado em um determinado momento da narrativa do filme. O valor calculado de 0,3c corresponde à velocidade média da espaçonave e, para um trajeto específico, não leva em consideração, por exemplo, eventuais aumentos de velocidade provocado pelo efeito estilingue. Esse efeito entra no regime da teoria da relatividade geral e ocorre quando um objeto em movimento é impulsionado pelo campo gravitacional de uma estrela ou um planeta.

3.3. Desaceleração da Avalon

Ampliando os questionamentos iniciais, é possível investigar ainda qual seria a aceleração a que os passageiros da Avalon estariam submetidos até a espaçonave atingir a velocidade de cruzeiro ou para sair dessa velocidade e entrar em repouso. Essa aceleração ou a desaceleração seriam factíveis para a condição humana suportar?

Em uma viagem convencional, os passageiros despertam 4 meses (aprox. $1{,}04 \times 10^7$ s) antes de chegarem ao planeta colônia. Considerando que esse intervalo de tempo seja o mesmo para desacelerar de forma constante a Avalon da velocidade de cruzeiro até zero, pela mecânica clássica, temos que

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(0 - 0,5c)}{(1,04 \times 10^7 - 0)} \cong -14,4 \text{ m/s}^2.$$

É interessante notar que o módulo desse valor corresponde a cerca de 1,47g, ou seja, uma vez e meia o valor da aceleração da gravidade experimentada na superfície da Terra (g). E se for adotado a velocidade da Avalon de 0,3c conforme calculado anteriormente, obtém-se um valor mais próximo ainda de g, cerca de 0,88g. Essa desaceleração experimentada pelos passageiros, enquanto se aproximam do planeta, poderia funcionar como um tipo de gravidade artificial.

4. Conclusão

Neste artigo, o filme *Passageiros* foi analisado do ponto de vista da teoria da relatividade restrita, revelando-se um rico potencial didático para explorar questões sobre dilatação temporal, contração espacial e coordenadas espaçotemporais registradas por diferentes referenciais inerciais. O ensino desses tópicos da física moderna exige um nível de abstração elevado e fogem do senso comum e do cotidiano da maioria das pessoas. Nesse aspecto, filmes e demais produções culturais podem auxiliar no processo de ensino-aprendizagem de diversos conceitos científicos por meio da criação e da discussão de cenários hipotéticos, criativos e instigantes. Ainda não esgotamos o potencial didático deste filme. Demais questões podem ser aprofundadas e debatidas em sala de aula, por exemplo: hibernação em viagens espaciais; fontes de energia para propulsão espacial; colonização planetária; efeitos físicos e mentais de uma viagem interplanetária; decisões humanas de cunho ético, legal e moral em situações de elevado estresse; entre outras.

Agradecimentos

Agradecemos à Maria L. das Chagas, Osman R. Nelson, Dory H.A. de Lima Anselmo e Eliziane Ataliba pela leitura crítica e apontamentos técnicos.

Recebido em: 23 de Março de 2022
Aceito em: 2 de Junho de 2022

Referências

[1] C.J. Efthimiou, R.A. Llewellyn, Phys. Educ. **42** 253 (2007).
[2] M. Tyldum, *Passengers* (Sony Pictures Releasing, United States, 2016).
[3] P.G. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2015).
[4] J. Walker, D. Halliday, R. Resnick, *Fundamentos de Física* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), v. 4.
[5] C. Efthimiou, R. Llewellyn, D. Maronde, T. Winningham, https://arxiv.org/abs/physics/0609154 (2006).
[6] V. Singh, The Physics Teacher **52**, 106 (2014).
[7] H. Theo, K. Magdalena, Phys. Educ. **56**, 025011 (2021).