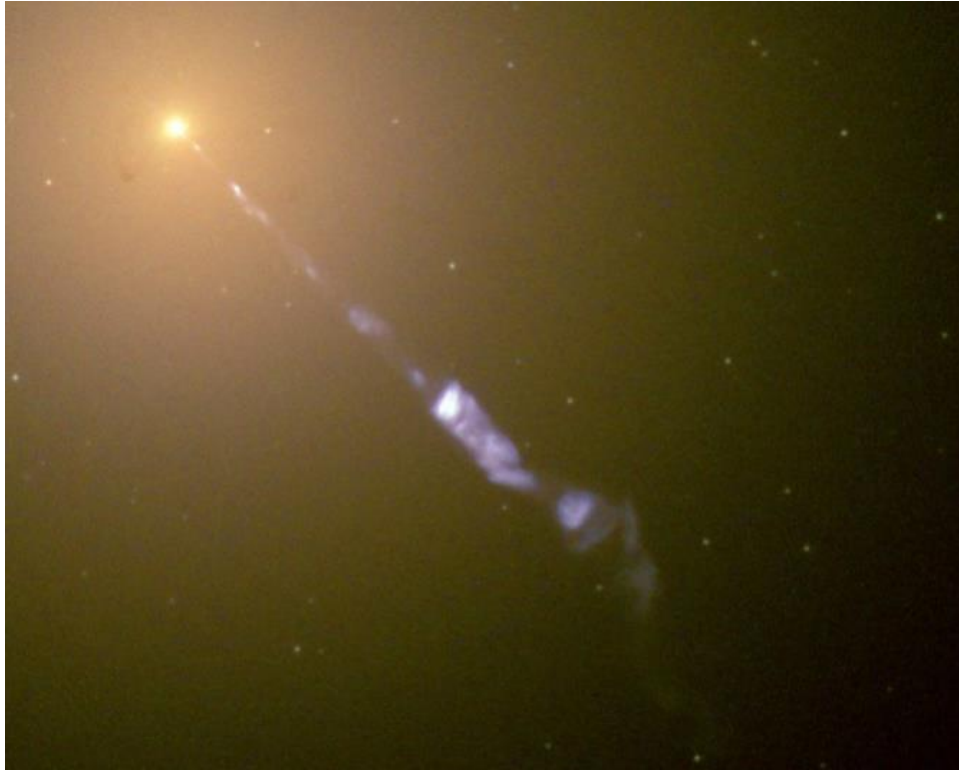


Capítulo 37 - Relatividade



Um jato de 5000 *anos – luz* de comprimento se projeta do centro da galáxia M87 (o ponto mais claro na extremidade superior esquerda do jato), que está a 5×10^7 *anos – luz* da Terra. O jato é formado por elétrons que se movem quase à velocidade da luz. Algo muito estranho deve estar acontecendo no centro da galáxia M87 para que os elétrons sejam ejetados com uma velocidade tão grande. Infelizmente, a galáxia está longe demais para que possamos ver com clareza o que existe no centro.

Como podemos saber o que existe no centro da galáxia M87?

37.1 Relatividade

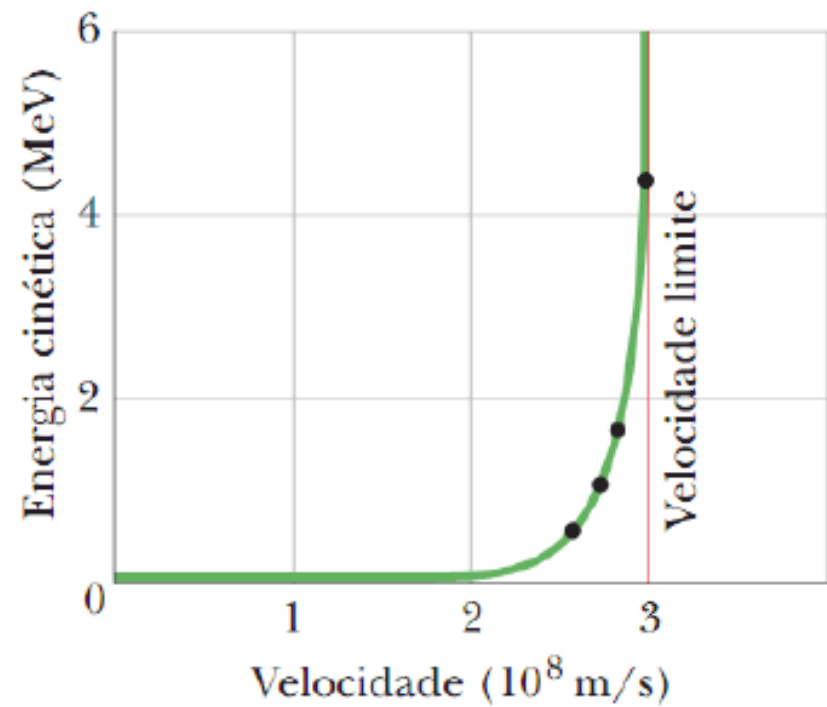
Relatividade é o campo de estudo dedicado à medida de eventos (acontecimentos): onde e quando ocorrem e qual a distância que os separa no espaço e no tempo. Além disso, a **relatividade** tem a ver com a relação entre os valores medidos em referenciais que estão se movendo um em relação ao outro (daí o nome **relatividade**).

A **Teoria da Relatividade Restrita**, proposta por Einstein em 1905, se aplica apenas a **referenciais inerciais**, ou seja, referenciais nos quais as leis de Newton são válidas. A **Teoria da Relatividade Geral** de Einstein se aplica a uma situação mais complexa, na qual os referenciais podem estar sujeitos a uma aceleração gravitacional.

37.2 Os Postulados da Relatividade

- 1. Postulado da Relatividade:** Todas leis da física (mecânica, eletromagnetismo e óptica) são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não existe um referencial absoluto.
- 2. Postulado da Velocidade da Luz:** A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.

A Velocidade-limite



Os pontos mostram valores experimentais da energia cinética de um elétron para diferentes valores de velocidade. Por maior que seja a energia fornecida a um elétron (ou qualquer outra partícula com massa) a velocidade da partícula jamais atinge ou supera a velocidade-limite. (A curva que passa pelos pontos mostra a previsão da **Teoria da Relatividade Restrita** de Einstein).

A velocidade-limite foi definida como sendo exatamente:

$$c = 299\,792\,458\text{ m/s.} \quad (37.1)$$

➤ Os cientistas já conseguiram acelerar elétrons a uma velocidade igual a $0,999\,999\,999\,95c$.

Um Teste do Postulado da Velocidade da Luz

Um pión neutro (π^0) decai em dois raios gama (γ) através da relação

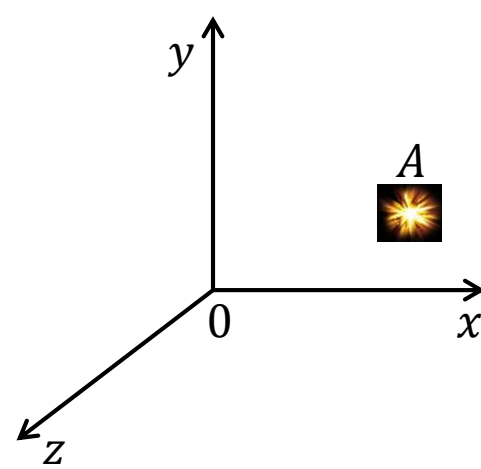
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (37.2)$$

Em um experimento realizado em 1964, físicos do CERN produziram um feixe de píons que se moviam com uma velocidade de $0,999\,75c$ em relação ao laboratório. Os cientistas mediram a velocidade dos raios gama (ondas eletromagnéticas) emitidos por esses píons e observaram que era igual à velocidade dos raios gama emitidos por píons em repouso em relação ao laboratório, confirmando assim o Postulado da Velocidade da Luz.

37.3 Registrando um Evento

Um **evento** é algo que acontece; um observador pode atribuir 4 coordenadas a um evento, 3 espaciais e 1 temporal. Exemplos de eventos: (1) o acender ou apagar de uma lâmpada; (2) a colisão entre duas partículas; (3) a passagem de um pulso luminoso por um dado ponto; (4) uma explosão; (5) a coincidência entre um ponteiro de um relógio e uma marca no mostrador.

Um observador em repouso em um certo referencial inercial poderia atribuir a um evento *A* as **coordenadas espaço-temporais** representadas na tabela abaixo.



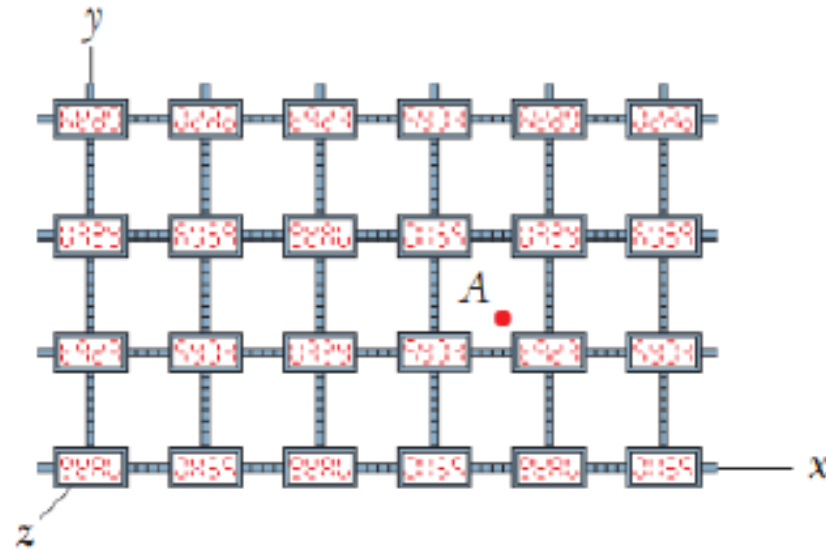
Registro do evento *A*

Coordenada	Valor
<i>x</i>	3,58 m
<i>y</i>	1,28 m
<i>z</i>	0 m
<i>t</i>	34,5 s

- Um dado evento pode ser registrado por vários observadores, cada um em um determinado referencial inercial. Em geral, observadores em diferentes referenciais inerciais atribuem ao mesmo evento coordenadas espaço-temporais diferentes!

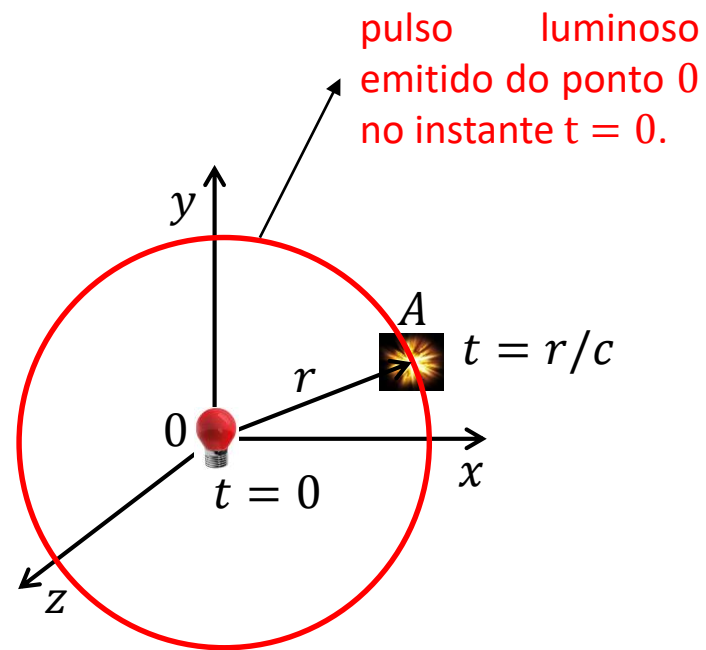
1. **Coordenadas espaciais.** Imaginamos que o sistema de coordenadas do observador dispõe de uma rede tridimensional de réguas paralelas aos três eixos de referência. As réguas são usadas para determinar as coordenadas espaciais do evento.
2. **Coordenada temporal.** Para determinar a coordenada temporal imaginamos que em cada ponto de interseção da rede de réguas é instalado um relógio.

Uma rede tridimensional de relógios e réguas através da qual um observador pode atribuir coordenadas espaço-temporais a um evento qualquer, como uma clarão no ponto A . As coordenadas espaciais do evento A são aproximadamente $x = 3,7$ unidades de comprimento, $y = 1,2$ unidades de comprimento e $z = 0$. A coordenada temporal é a hora indicada pelo relógio mais próximo de A no instante em que acontece o clarão da explosão.



Como sincronizar uma rede de relógios?

Para sincronizar os relógios, um observador convoca um grande grupo de auxiliares temporários, um para cada relógio. Depois de se colocar em um ponto escolhido para ser a origem (0) o observador produz um pulso luminoso no momento em que seu relógio indica $t = 0$. Quando o pulso luminoso chega ao local onde se encontra um dos auxiliares, esse auxiliar ajusta o relógio desse local para indicar $t = r/c$, onde r é a distância entre o auxiliar e a origem 0.

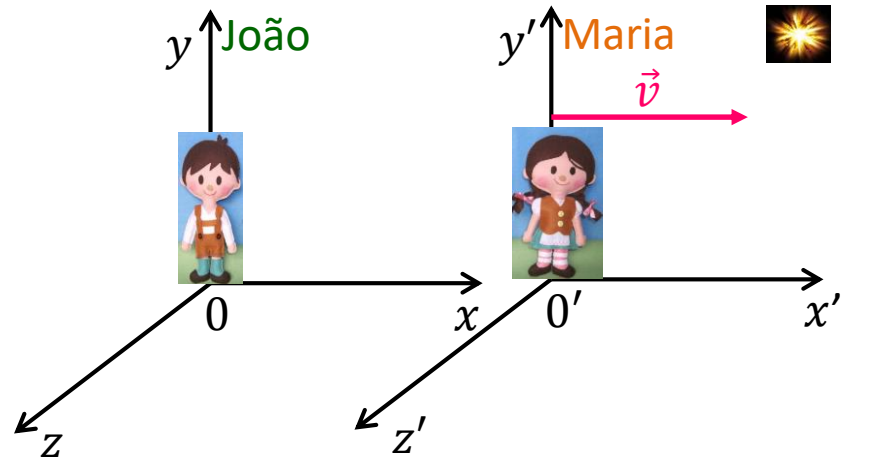


- 3. Coordenadas espaço-temporais.** O observador pode atribuir coordenadas espaço-temporais a um evento simplesmente registrando o tempo indicado pelo relógio mais próximo do evento e a posição indicada pelas réguas mais próximas. No caso de dois eventos, o observador considera a distância no tempo como a diferença entre os tempos indicados nos relógios mais próximos dos dois eventos e a distância no espaço como a diferença entre as coordenadas indicadas pelas réguas mais próximas dos dois eventos. Procedendo dessa forma evitamos o problema prático de calcular o tempo de trânsito dos sinais que chegam ao observador.

37.4 A Relatividade da Simultaneidade

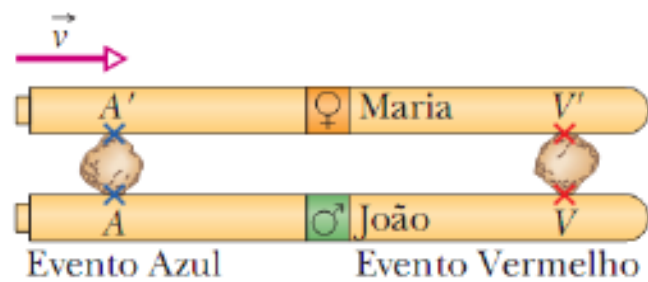
- Dois observadores em movimento relativo não concordam, em geral, quanto a simultaneidade de dois eventos. Se um dos observadores os considera simultâneos, o outro em geral conclui que não são simultâneos.

Evento A

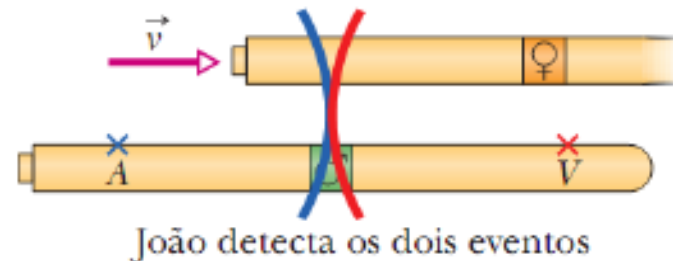


- A simultaneidade não é um conceito absoluto e sim um conceito relativo, que depende do movimento do observador.

Examinando a Simultaneidade Mais de Perto

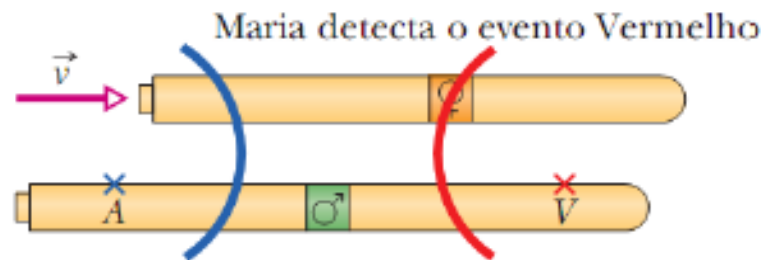


(a)



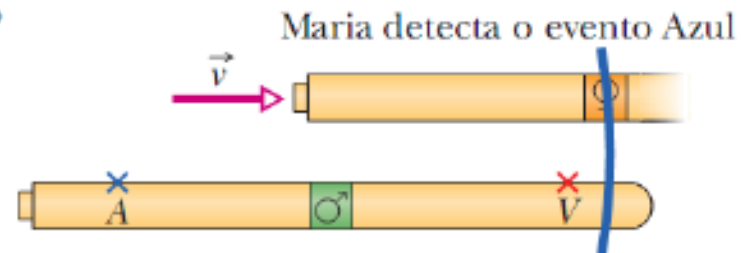
(b)

As ondas dos dois eventos chegam simultaneamente a João, mas ...



(c)

... a onda do evento Vermelho chega primeiro a Maria.



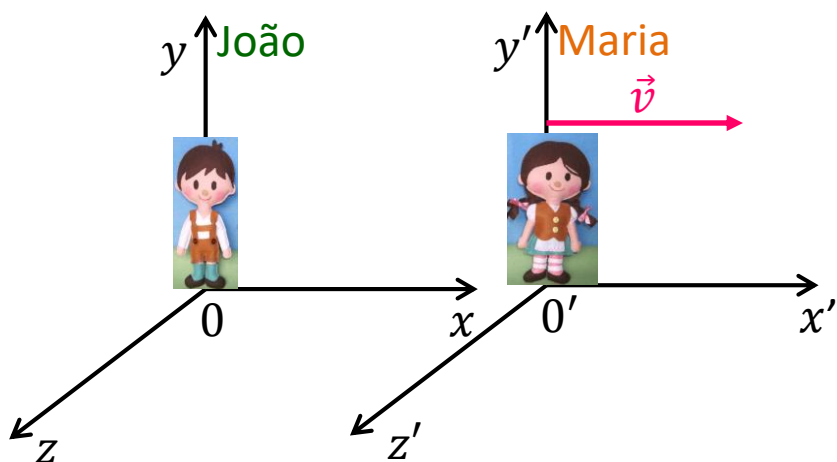
(d)

As espaçonaves de João e Maria e os eventos do ponto de vista de João. A espaçonave de Maria está se movendo para direita com velocidade \vec{v} em relação à João. (a) O evento Vermelho ocorre na posição VV' e o evento Azul ocorre na posição AA' ; os dois eventos produzem ondas luminosas. (b) João detecta simultaneamente as ondas dos eventos Vermelho e Azul. (c) Maria detecta a onda do evento Vermelho antes de João detectar os dois eventos. (d) Maria detecta a onda do evento Azul depois de João detectar os dois eventos.

37.5 A Relatividade do Tempo

❖ O intervalo de tempo entre dois eventos depende da distância entre os eventos tanto no espaço como no tempo, ou seja, as separações espacial e temporal são interdependentes.

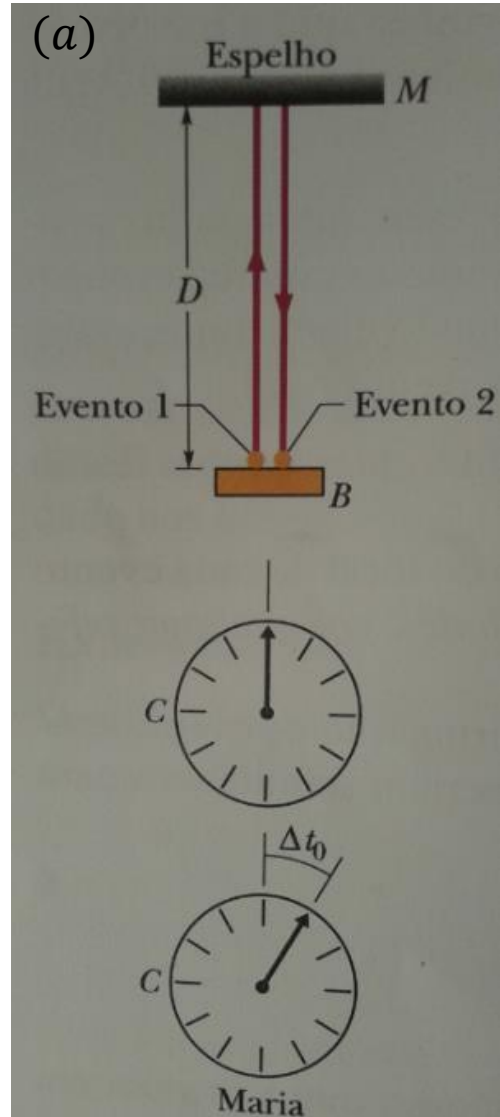
Exemplo: A figura ao lado mostra um experimento realizado por Maria quando a moça e seu equipamento (uma fonte luminosa, um espelho, um detector e um relógio) estão a bordo de um trem que se move com velocidade \vec{v} em relação a uma estação.



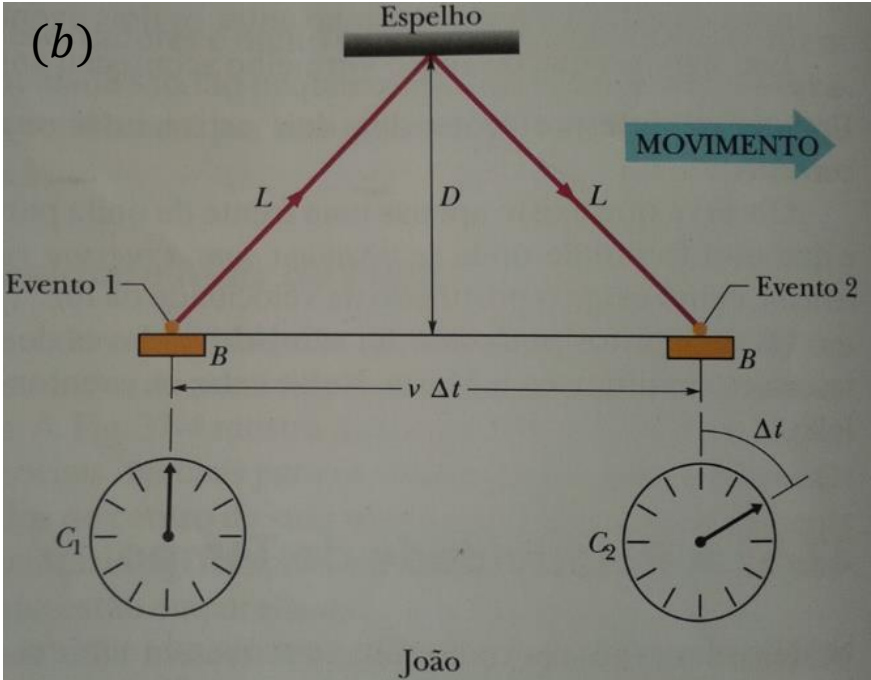
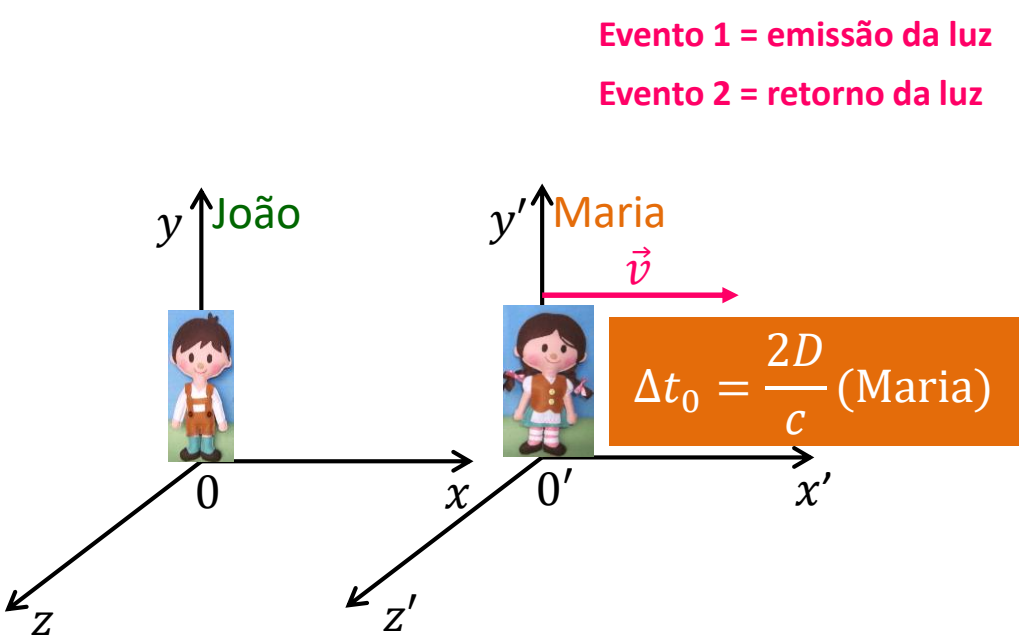
Evento 1 = emissão da luz
Evento 2 = retorno da luz

De acordo com Maria, o intervalo de tempo Δt_0 entre os dois eventos é

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c} \quad (\text{Maria}). \quad (37.3)$$



Considere de que forma os mesmos dois eventos são medidos por João, que está na plataforma de estação quando o trem passa.



De acordo com João, o intervalo de tempo Δt entre os dois eventos é

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \quad (\text{João}), \quad (37.4)$$

onde

$$L = \sqrt{\left(\frac{1}{2} v \Delta t\right)^2 + D^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} v \Delta t\right)^2 + \left(\frac{1}{2} c \Delta t_0\right)^2} \quad \rightarrow \quad \frac{c \Delta t}{2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} v \Delta t\right)^2 + \left(\frac{1}{2} c \Delta t_0\right)^2}$$

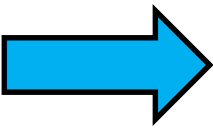
$$\left(\frac{c \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2} v \Delta t\right)^2 + \left(\frac{1}{2} c \Delta t_0\right)^2 \quad \rightarrow \quad \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (37.7)$$

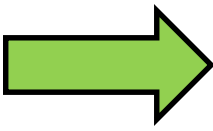
- ❖ Quando dois eventos ocorrem no mesmo ponto do espaço de um referencial inercial o intervalo de tempo entre os eventos, medidos nesse referencial, é chamado de **intervalo de tempo próprio** ou **tempo próprio**. Quando esse intervalo de tempo é medido por outro referencial o resultado é sempre maior que o intervalo de tempo próprio.
- O fenômeno do aumento de intervalo de tempo em consequência do movimento do referencial utilizado é chamado de **dilatação dos tempos**.

Definições úteis

$$\beta \equiv \frac{v}{c} \text{ (parâmetro de velocidade)}$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ (fator de Lorentz) (37.8)}$$


$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$


$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 \text{ (dilatação dos tempos) (37.9)}$$

Exercícios sugeridos da Seção 37.5: 1, 3, 4, 5, 6 e 7.

1) O tempo médio de vida de múons estacionários é de $2,2000 \mu s$. O tempo médio de vida dos múons de alta velocidade produzidos por um certo raio cósmico é de $16,000 \mu s$ no referencial da Terra. Determine, com cinco algarismos significativos, a velocidade em relação à Terra dos múons produzidos pelo raio cósmico.

Dica:
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Respostas: $v = 0,99050 c$.

