

Relatividade Restrita: Sincronizar Relógios

Michael Fowler

Universidade de Virgínia, Departamento de Física

Suponha que é necessário sincronizar dois relógios que se encontram a uma determinada distância um do outro. Uma possibilidade é colocarmo-nos próximo de um dos relógios e observar o outro por intermédio de um telescópio, mas nesse caso não podemos esquecer que estamos a ver o segundo relógio *tal como era quando a luz o deixou*, e portanto devemos efetuar as correções necessárias. Outra possibilidade para garantir que os dois relógios estão sincronizados, assumindo que ambos são igualmente precisos, é iniciar simultaneamente em ambos a contagem do tempo. Pode-se por exemplo ligar uma fotocélula a cada um dos relógios, de modo a que a contagem do tempo tenha início quando estas fotocélulas receberem um *flash* de luz.



Os relógios iniciam a contagem do tempo quando o *flash* de luz proveniente da lâmpada central atinge as fotocélulas.

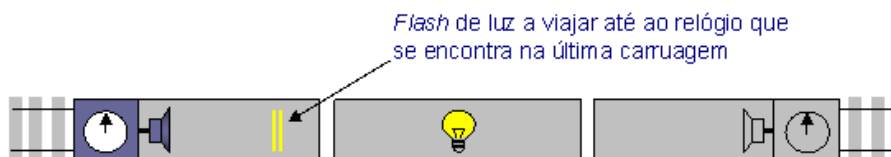
Se se colocar uma lâmpada de *flash* no ponto médio da reta que une os dois relógios e esta emitir um *flash*, a luz demorará o mesmo tempo a atingir os dois relógios, e portanto a contagem do tempo terá início simultaneamente nos dois relógios, estando estes sincronizados.

Vamos agora imaginar toda esta montagem – os dois relógios e a lâmpada de *flash* colocada exatamente no meio destes – num comboio em movimento e com velocidade v no sentido da esquerda para a direita, sendo o valor de v de aproximadamente metade da velocidade da luz.

Analisemos atentamente a operação de sincronização do relógio (montado em cima do comboio), vista do solo. De facto, um observador que se encontre no solo dirá que os relógios não estarão sincronizados no final da operação! O motivo relaciona-se com o facto de o observador ser capaz de ver a luz que parte da lâmpada a mover-se em ambos os sentidos com velocidade c em relação ao solo, mas também ser capaz de ver que a última carruagem do comboio viaja a uma velocidade v no sentido contrário do *flash* (aproximando-se deste), enquanto a primeira carruagem se move a uma velocidade v no sentido do movimento do *flash* (procurando afastar-se deste), e portanto neste último caso a luz deve percorrer uma maior distância para atingir o relógio.

De facto, quando a situação é analisada a partir do solo, não é difícil determinar quanto tempo mais precisa a luz para chegar ao relógio que se encontra na primeira carruagem do comboio, em comparação com o tempo necessário para que a luz chegue ao relógio que se encontra na última carruagem. Em primeiro lugar, deve-se ter em conta que o comboio,

visto a partir do solo, tem de comprimento $L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.



O comboio move-se para a direita e a lâmpada no centro emite um *flash* de luz. Vista a partir do solo, a luz que se move no sentido da última carruagem (para a esquerda) tem velocidade c , e a carruagem tem velocidade v de sentido oposto (para a direita).

Se t_B for o tempo necessário para que o *flash* de luz viaje até à última carruagem, torna-se claro a partir da figura que

$$vt_B + ct_B = \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

e t_B é dado por

$$t_B = \frac{1}{c+v} \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Do mesmo modo, o tempo que o *flash* de luz demora a viajar até à primeira carruagem do comboio, t_F , é (tal como medido pelo observador que se encontra no solo)

$$t_F = \frac{1}{c-v} \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Assim sendo, a diferença entre os instantes de ativação dos dois relógios (medida pelo observador que se encontra no solo) é dada por:

$$t_F - t_B = \left(\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v} \right) \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Leftrightarrow$$

$$t_F - t_B = \left(\frac{2v}{c^2 - v^2} \right) \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Leftrightarrow$$

$$t_F - t_B = \frac{2v}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{L}{2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Leftrightarrow$$

$$t_F - t_B = \frac{vL}{c^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Não devemos esquecer que esta diferença corresponde ao intervalo de tempo que decorre desde o início da contagem do tempo no relógio que se encontra na última carruagem e o início da contagem do tempo no relógio que se encontra na primeira carruagem do comboio, e foi determinada por um observador que se encontra em repouso no solo e utilizando um relógio que também se encontra em repouso no solo. Contudo, para este observador, o tempo decorre mais lentamente nos relógios que se encontram no comboio, por um factor de $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Por isso, apesar de o observador no solo ter determinado que o relógio da última carruagem regista mais $\frac{vL}{c^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ segundos que o relógio da primeira carruagem, ao olhar diretamente para os dois relógios que se encontram no comboio, o observador conclui que o relógio que se encontra na última carruagem marca o tempo $\frac{vL}{c^2}$ segundos no instante em que o relógio da primeira carruagem inicia a contagem do tempo.

Para resumir, e analisando a situação a partir do solo, nos dois relógios do comboio (que se move com velocidade v na direção x) o tempo decorre mais lentamente, registando apenas $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ por cada segundo que passa. É igualmente importante notar que os relógios - sincronizados para um observador que se encontre num comboio - parecem dessincronizados quando vistos a partir do solo, com o relógio da última carruagem a registar mais $\frac{vL}{c^2}$ segundos do que o relógio da carruagem da frente (L corresponde ao comprimento do comboio quando este se encontra em repouso, comprimento esse que é medido por um observador no comboio).

Note que se $L = 0$, isto é, se os relógios estão juntos, os observadores, quer estejam no solo ou no comboio, concordarão que os relógios se encontram sincronizados. É necessária uma determinada distância entre os relógios, tal como um movimento relativo, para que haja desacordo dos observadores quanto à sincronização dos relógios.

