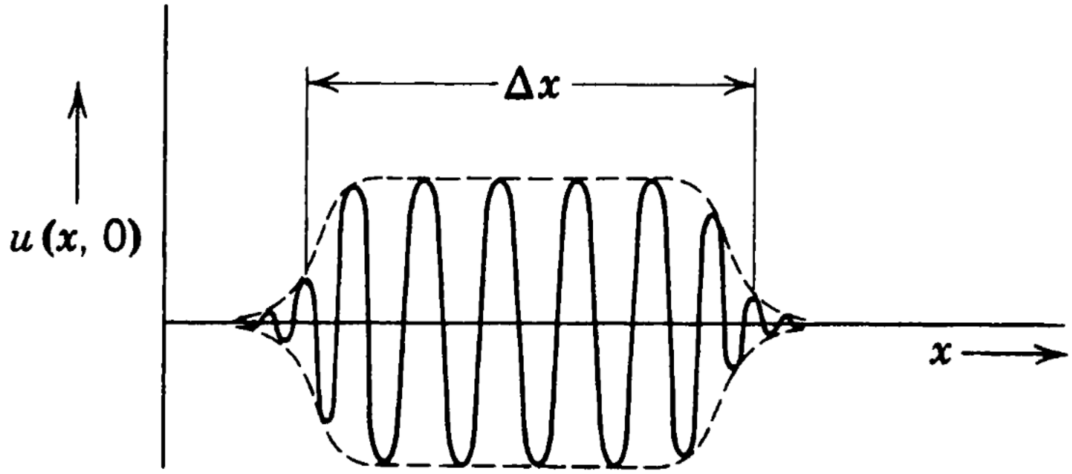
1.7 - Efeito Doppler Relativístico



Considere a "fotografia" de um trem de ondas. (Um trem de ondas não é uma onda senoidal, mas uma superposição de ondas senoidais.) A fotografia é um instantâneo, isto é, uma imagem a tempo fixo $(\Delta t = 0)$. No referencial S o trem de ondas ocupa uma distância Δx e o comprimento de onda é λ; o número de ondas (vagões) do trem vale $N = \dfrac{\Delta x}{\lambda}$.

A fase da onda eletromagnética é dada por : $\Phi(x,t) = 2\pi\left(\dfrac{x}{\lambda} - \dfrac{t}{T}\right)$, onde T é o período medido em S. Fazendo $\Delta t = 0$, obtemos: $\Delta\Phi = 2\pi \dfrac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi\ N$.

Outro referencial S´, que se move com velocidade *u* em relação a S, também tira uma fotografia $(\Delta t' = 0)$ do trem de ondas. O comprimento do trem medido em S´ será $\Delta x' \neq \Delta x$ e o comprimento de onda será $\lambda' \neq \lambda$, mas o número de vagões do trem tem que ser o mesmo, logo: $\Delta\Phi' = 2\pi \dfrac{\Delta x'}{\lambda'} = 2\pi\ N$.

Em outro experimento, um observador em S localizado numa posição fixa $(\Delta x = 0)$ mede o período da onda: $T = \dfrac{\Delta t}{N}$. Um observador em S´ medirá um período diferente, pois os N vagões levam um tempo $\Delta t' \neq \Delta t$ para passar por ele: $T' = \dfrac{\Delta t'}{N}$.

Em resumo: a fase de uma onda eletromagnética é *invariante* por transformações de Lorentz, isto é:

$$\Phi'(x',t') = 2\pi\left(\frac{x'}{\lambda'} - \frac{t'}{T'}\right) = 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) = \Phi(x,t) \qquad (1.24)$$

Lembrando que $\dfrac{2\pi}{\lambda} = k$ e $\dfrac{2\pi}{T} = \omega = 2\pi\ f = c\,k$, temos que $k'(x' - ct') = k(x - ct)$. Usando as transformações de Lorentz (1.16) :

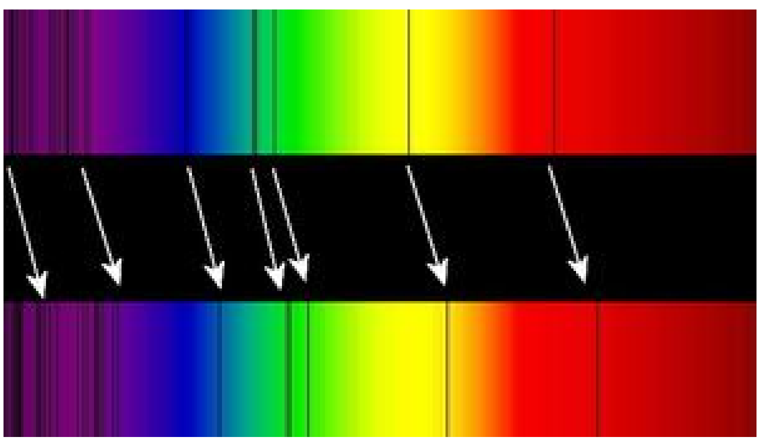
$x' = \gamma(u)(x - ut),\quad t' = \gamma(u)\left(t - \frac{ux}{c^2}\right)$, obtemos a relação entre as freqüências medidas em S e S´:

$$\frac{f'}{f} = \sqrt{\frac{1-\frac{u}{c}}{1+\frac{u}{c}}} \qquad \text{ou} \qquad f' = f\,\gamma(u)\left(1-\frac{u}{c}\right), \tag{1.25}$$

onde f é a freqüência medida no referencial de repouso da fonte e f' é a freqüência medida em outro referencial.

Em caso de afastamento entre fonte e observador, isto é, $u > 0$, a freqüência observada é menor que a freqüência emitida pela fonte. Este efeito é chamado de *deslocamento para o vermelho (ou "redshift")*. Em caso de aproximação relativa, $u < 0$, a freqüência observada é maior que a emitida, efeito chamado de *deslocamento para o azul (ou "blueshift")*.

$\leftarrow \quad f$



$\lambda \quad \rightarrow$

Notem que só há uma fórmula para o efeito Doppler relativístico, porque só o que importa é o movimento relativo entre fonte e observador. No caso de ondas sonoras, há duas situações fisicamente diferentes: fonte em repouso em relação ao ar e observador em movimento em relação ao ar, e fonte em movimento em relação ao ar e observador em repouso em relação ao ar. Isso acontece porque as ondas sonoras precisam de um meio material para a sua propagação, portanto este meio constitui um referencial privilegiado.