

Efeito Doppler

Roberto Ortiz

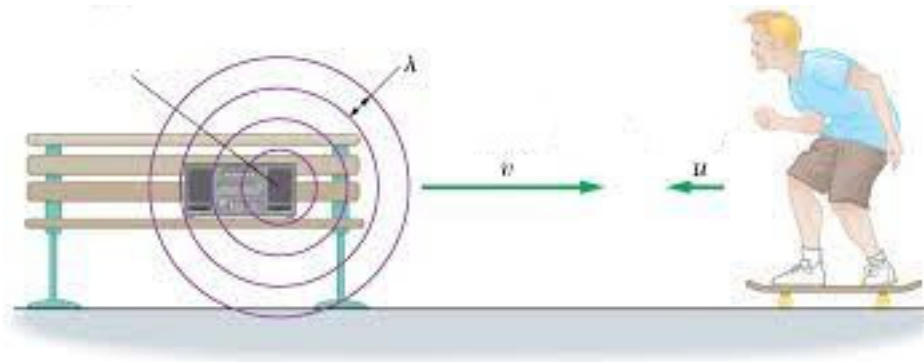
Professor Livre-Docente
EACH – USP

Efeito Doppler: o que é?

- É a mudança de frequência percebida por um receptor quando:
 - A fonte (de ondas) se move com relação ao receptor
 - O receptor se move com relação à fonte
 - Ambos se movem
- A frequência percebida pode ser maior ou menor que a frequência original, emitida pela fonte, dependendo da velocidade relativa do emissor e receptor.

Caso I: fonte em repouso, receptor em movimento

- Exemplo: uma ambulância (ou carro de polícia) parado(a) no trânsito, ouvinte em movimento.
- Sejam: f_0 a frequência original emitida pela fonte, v a velocidade de propagação das ondas no meio e u a velocidade do observador relativa à fonte.

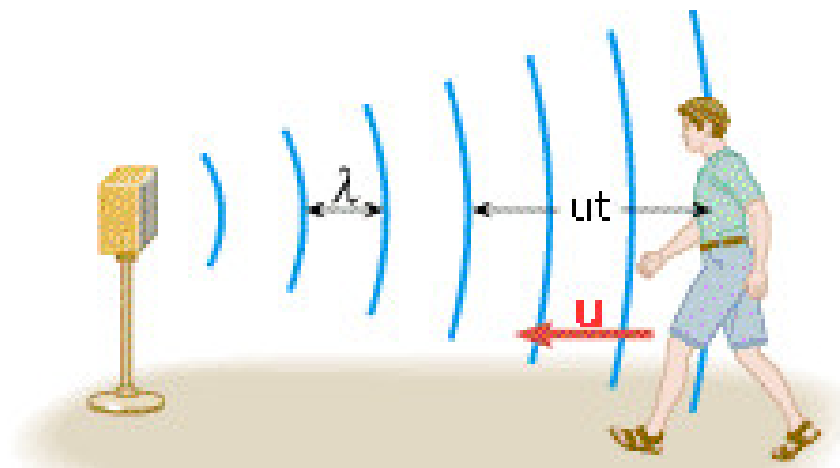


- Quantas ondas (N) passam pelo receptor num tempo t ?
 - Se o observador estivesse parado:

$$N_o = f_o \times t = (v / \lambda) t$$

- Quando o observador se move em direção à fonte ele recebe um número adicional de ondas, devido à sua velocidade de aproximação u :

$$N_u = (u / \lambda) t$$



- Logo, o número efetivamente recebido pelo observador em movimento é:

$$N' = N_0 + N_u = (v / \lambda + u / \lambda) t$$

- Portanto, a frequência percebida pelo observador em aproximação é:

$$f' = N' / t = (v / \lambda + u / \lambda)$$

- Se o observador se afastasse da fonte ele receberia menos ondas da fonte, logo a frequência percebida seria menor pelo mesmo fator u / λ ..:

$$f' = N' / t = (v / \lambda - u / \lambda)$$

$$f' = \frac{v \pm u}{\lambda} = \frac{v \pm u}{v/f_0}$$

$$f' = f_0 \frac{v + u}{v}$$

observador aproximando-se

$$f' = f_0 \frac{v - u}{v}$$

observador afastando-se

Exemplo: uma pessoa dirige seu carro a uma velocidade de 90 km/h, dirigindo-se diretamente a um sinal sonoro ferroviário (passagem de nível). Ele percebe o som a uma frequência de 500 Hz. Qual é a frequência original, isenta de efeito Doppler, emitida pelo sinal sonoro? Considere a velocidade do som no ar: $v = 340$ m/s.

Sol.: o observador aproxima-se da fonte sonora, logo a frequência percebida é maior do que a frequência emitida.

Inicialmente convertemos a velocidade do observador para m/s:

$$90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$f' = f_0 \frac{v + u}{v}$$

$$500 = f_0 \frac{340 + 25}{340}$$

Logo, a frequência originalmente emitida pelo sinal ferroviário é:

$$f_0 = 465,7 \text{ Hz}$$

Note portanto que a frequência percebida pelo observador (500 Hz) é maior do que aquela originalmente emitida.

Caso II: fonte em movimento, receptor em repouso

- Exemplo: uma pessoa parada na calçada ouve a sirene de uma ambulância em movimento.
- Sejam: f_0 a frequência original emitida pela fonte, v a velocidade de propagação das ondas no meio e u a velocidade da fonte sonora relativa ao observador.
 - Quando a fonte se move em direção ao observador, o comprimento de onda percebido (λ') por este é menor que o original.
 - Quando a fonte se afasta do observador, o comprimento de onda percebido (λ') é maior que o original.

Sejam λ_0 e f_0 as frequências emitidas pela fonte em repouso

Aproximação:

$$\lambda' < \lambda_0 \rightarrow f' > f_0$$



Afastamento:

$$\lambda' > \lambda_0 \rightarrow f' < f_0$$

Vamos calcular a distância entre duas ondas consecutivas (λ). O comprimento de onda λ é a distância percorrida pela onda num tempo $t = T = 1/f$. A velocidade da onda é v .

No caso de aproximação entre a fonte e o observador essa distância vale:

$$\lambda' = \lambda_0 - u T$$

$$\lambda' = \lambda_0 - u / f_0 \quad (\text{pois } T = 1 / f)$$

$$v / f' = v / f_0 - u / f_0$$

$$v / f' = (v - u) / f_0$$

$$f' = f_0 (v / (v - u))$$

No caso de uma fonte que se afasta do observador com velocidade u o cálculo da frequência f' é semelhante. O comprimento de onda percebido pelo observador é maior do que o original, ou seja:

$$\lambda' = \lambda_0 + u T$$

$$\lambda' = \lambda_0 + u / f_0 \quad (\text{pois } T = 1 / f)$$

$$v / f' = v / f_0 + u / f_0$$

$$v / f' = (v + u) / f_0$$

$$f' = f_0 (v / (v + u))$$

Exemplo: calcule a frequência de uma sirene de ambulância emitida a uma frequência de 500 Hz, quando esta se dirige a um observador a uma velocidade de 90 km/h. Calcule também para o caso em que a ambulância se afasta com essa mesma velocidade.

Dado: $v_{\text{som}} = 340 \text{ m/s}$

Sol.: inicialmente transformamos a velocidade da ambulância para m/s:

$$u = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$f' = f_0 \left(v / (v - u) \right)$$

$$f' = 500 \times (340 / (340 - 25)) = 539,7 \text{ Hz} \quad (\text{aproximando-se})$$

$$f' = 500 \times (340 / (340 + 25)) = 465,7 \text{ Hz} \quad (\text{afastando-se})$$

Caso III: fonte e receptor, ambos em movimento.

- Podemos combinar as equações que já obtivemos.
- Sejam: f_0 a frequência original emitida pela fonte, v a velocidade de propagação das ondas no meio e u_e a velocidade da fonte sonora (emissora) relativa ao observador e u_r a velocidade do receptor.

$$f' = f_0 \frac{v \pm u_r}{v}$$

fonte em repouso,
observador em movimento

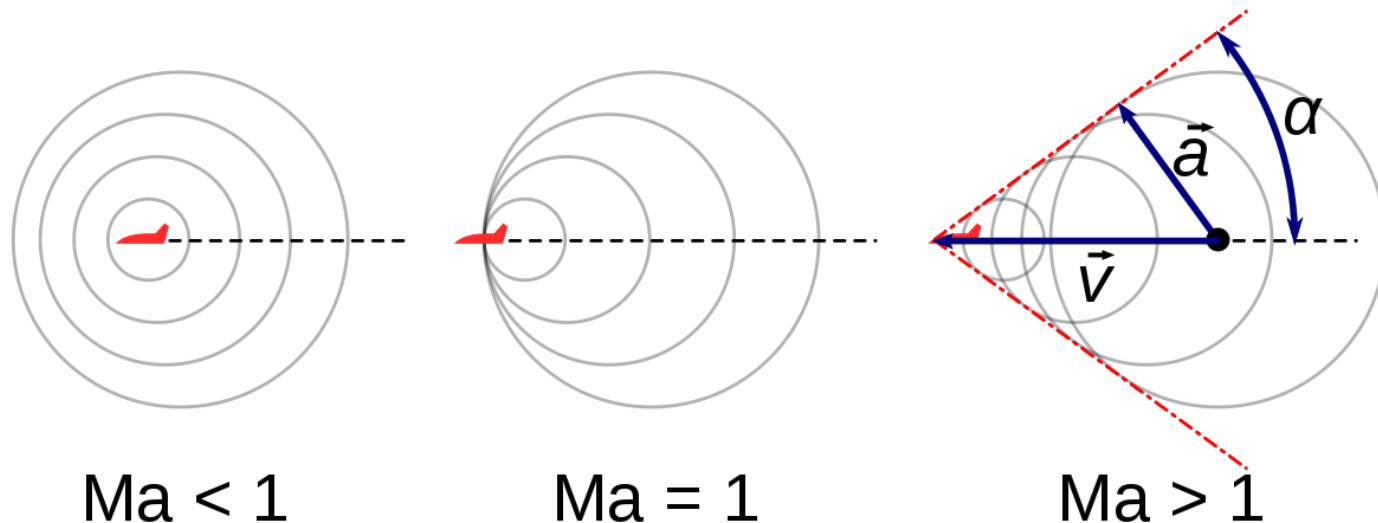
$$f' = f_0 \frac{v}{v \mp u_e}$$

fonte em movimento,
observador em repouso

$$f' = f_0 \left(\frac{v \pm u_r}{v} \right) \times \left(\frac{v}{v \mp u_e} \right) = f_0 \left(\frac{v \pm u_r}{v \mp u_e} \right)$$

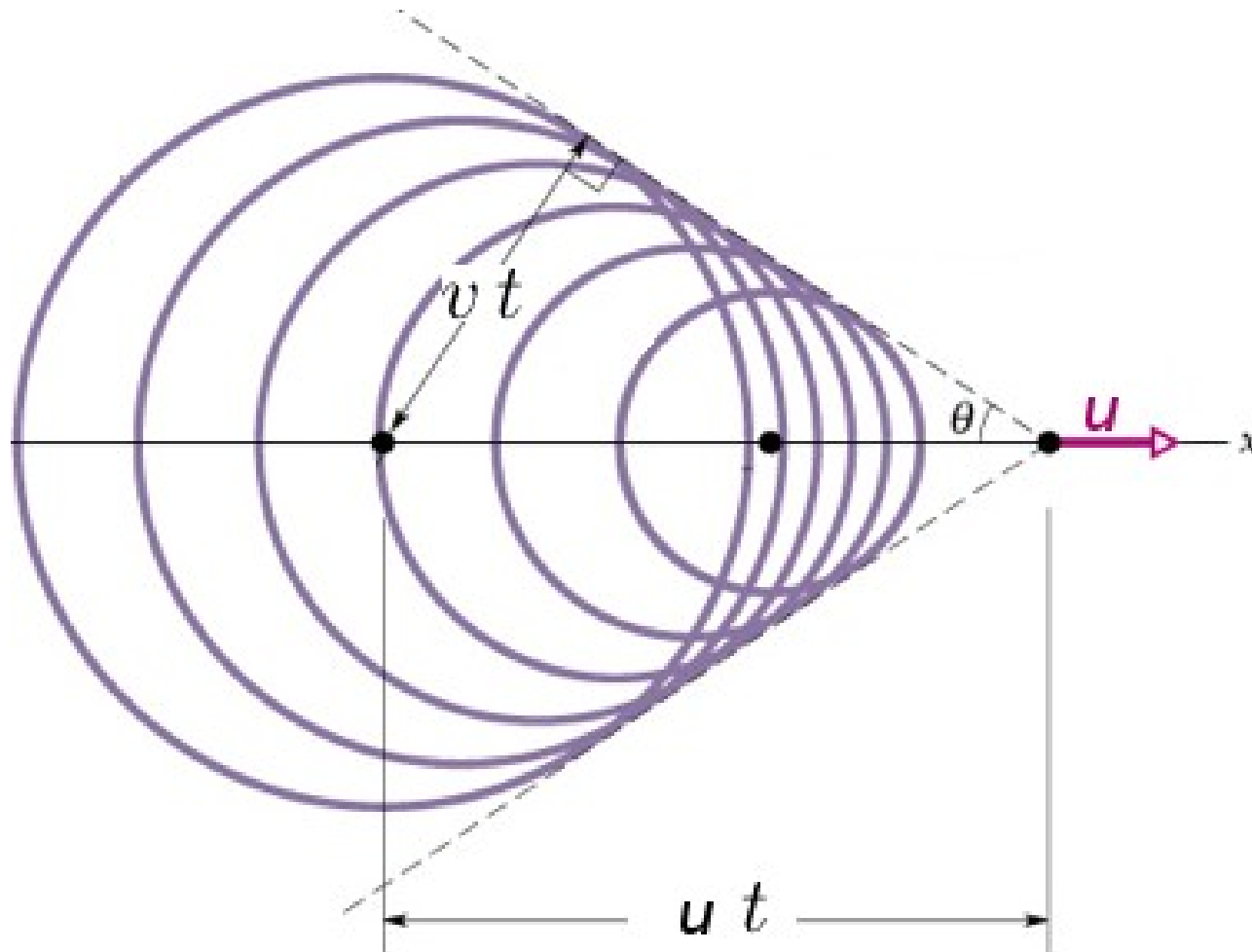
Movimento supersônico

- Note que nas equações anteriores a velocidade da fonte sonora (u_e) era sempre considerada menor do que a velocidade do som (v).
- Quando isso não acontece, o movimento é dito supersônico, i.e. $u_e > v$
- Seja *Mach* (abrev. Ma) a razão: $Ma = u_e / v$



O ângulo θ é chamado ângulo do cone de Mach

$$\sin \theta = vt / ut = v / u$$





Movimento supersônico não implica necessariamente em altas velocidades!



Fim