

Efeito Doppler

Efeito Doppler é a alteração aparente na frequência de uma onda relacionada ao movimento da fonte ou do observador, e não ao aumento de intensidade pela maior ou menor proximidade à fonte. O efeito, proposto por Johan Christian Doppler em 1842 e testado em 1845 por Buys Ballot, ocorre tanto com ondas sonoras quanto eletromagnéticas. Se a fonte e o observador se aproximam, o som torna-se mais agudo, ao passo que se eles se afastam, torna-se mais grave.

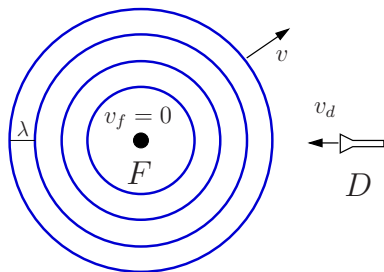
Como **aplicação**, temos a detecção, por radar, da velocidade de automóveis. Pela diferença entre a frequência emitida e a refletida pelo carro, pode-se estimar a velocidade *radial* deste. Além disso, em medicina se usa ultrassom doppler que permite observar o fluxo sanguíneo a partir das ondas de som refletidas. Pode ser usado também para detectar a existência de planetas ao redor de outras estrelas: se o movimento perturbado da estrela fizer com que esta se aproxime e se afaste de nós, isso pode ser detectado pela sua luz.

Vamos tomar como referencial o meio (ar) no qual as ondas sonoras se locomovem¹¹⁵: a velocidade da fonte e do detector são relativas ao ar, que em princípio está estacionário e podemos colocá-lo no sistema de referência da Terra.

Fonte Estacionária e Detector em Movimento

Consideremos uma fonte estacionária F ($v_f = 0$) emitindo ondas de frequência f_0 e comprimento de onda λ_0 , as quais se afastam radialmente. A frequência f registrada por D é a taxa com que este intercepta as frentes de onda. Se D também está em repouso, esta frequência é a mesma da fonte:

$$f = f_0 = \frac{v}{\lambda_0} \rightarrow \lambda_0 = \frac{v}{f_0}.$$



Se D se aproxima da fonte com velocidade v_d (movimento 1d), a frequência aumenta ($f \geq f_0$):

$$f = \frac{v + v_d}{\lambda_0} = \frac{v + v_d}{v/f_0} = f_0 \left(1 + \frac{v_d}{v}\right).$$

O comprimento de onda não se modifica neste caso pois o referencial é o ar e quem se desloca é o detector. Assim, a frequência é alterada, bem como a velocidade da onda. Quando o

detector se move na direção oposta ($f \leq f_0$):

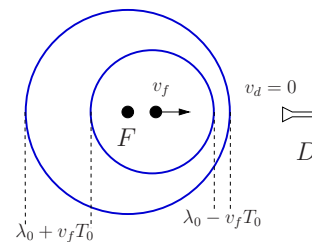
$$f = \frac{v - v_d}{\lambda_0} = f_0 \left(1 - \frac{v_d}{v}\right).$$

Note que, neste caso, se $v_d > v$, $f < 0$ significa que a onda nunca chegará até o detector, pois ele se move mais rápido na outra direção. Combinando estas equações:

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v_d}{v}\right). \quad (109)$$

Fonte em Movimento e Detector Estacionário

Neste caso, λ se altera pois a fonte se desloca em relação às frentes de onda: diminui se a fonte se aproxima do detector e aumenta caso se afaste.



Seja $T_0 = 1/f_0$ o tempo decorrido entre a emissão de duas frentes de onda consecutivas, isto é, o período. Após emitir uma frente, a fonte se desloca uma distância $v_f T_0$ até emitir uma segunda frente. Assim, o comprimento de onda percebido pelo detector, no caso que F se aproxima de D é

$$\lambda = \lambda_0 - v_f T_0 = \frac{v - v_f}{f_0}$$

e

$$\lambda = \lambda_0 + v_f T_0 = \frac{v + v_f}{f_0}$$

se F e D se afastam. Combinando essas equações:

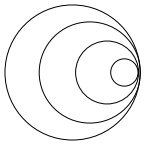
$$\lambda = \frac{v \mp v_f}{f_0}.$$

E a frequência detectada será

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v f_0}{v \mp v_f}. \quad (110)$$

Note que como o detector está imóvel em relação ao meio, a velocidade da onda é a mesma.

¹¹⁵A menos que seja explicitado (no final da aula), estamos considerando exclusivamente ondas sonoras. Ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio material para se deslocar.



Quando F se aproxima de D à velocidade do som ($v_f \rightarrow v$), $\lambda \rightarrow 0$ e $f \rightarrow \infty$, isto é, a fonte se move tão rápido que alcança suas próprias frentes de onda, que se acumulam. Neste ponto, como temos muitas frentes superpostas, há muita turbulência, sentida por aviões ao quebrar a barreira do som.

f_0 que refletem na borboleta e voltam para ele com frequência f' . Ele ajusta a frequência emitida até que $f' = 84$ kHz, que corresponde ao máximo de sensibilidade para a audição de um morcego. Qual é a frequência f_b das ondas ouvidas e refletidas pela borboleta? Qual a frequência f_0 emitida pelo morcego?

A frequência recebida pela borboleta é:

$$f_b = f_0 \frac{v + v_b}{v - v_m} = f_0 \frac{340 + 8}{340 - 9} = \frac{348}{331} f_0.$$

A onda refletida é recebida pelo morcego com frequência

$$f' = f_b \frac{v + v_m}{v - v_b} = \frac{348}{331} f_0 \frac{349}{332} = 84 \text{ KhZ}.$$

Então, $f_0 \simeq 76$ kHz e $f_b \simeq 80$ kHz.

Exemplo 61: Super-homem se aproxima, voando, de uma pessoa em perigo e grita, avisando-a. Se a frequência do som emitido é 200 Hz e sabendo que conseguimos distinguir as palavras até uma frequência de 800 Hz, qual a máxima velocidade que ele pode atingir e ainda permanecer inteligível?

$$f = 200 \frac{340}{340 - v} = 800 \rightarrow v = 255 \text{ m/s} = 918 \text{ km/h}$$

Fonte e Detector em Movimento

Se $v_f \neq 0$ e $v_d \neq 0$, podemos combinar as Eqs. (109) e (110):

$$f = f_0 \frac{v \pm v_d}{v \mp v_f}. \quad (111)$$

A frequência não depende somente da velocidade relativa, o que é consequência do ar ser um sistema de referência privilegiado para a propagação das ondas sonoras. Porém, se os dois se movem com a mesma velocidade e sentido, $v_f = v_d$ (velocidade relativa zero), não há variação na frequência, $f = f_0$. As possibilidades para os sinais são:

D	F	$\pm v_d$	$\pm v_f$
\rightarrow	\leftarrow	+	-
\rightarrow	\rightarrow	-	-
\leftarrow	\leftarrow	+	+
\leftarrow	\rightarrow	-	+

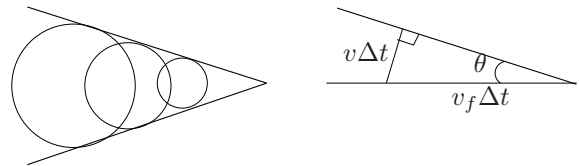
Exemplo 62: Os morcegos se orientam e encontram suas presas emitindo ondas ultra-sônicas (ondas sonoras com frequências mais altas que as detectáveis pelo ouvido humano) e, depois, recebendo os reflexos¹¹⁶. Um morcego voa na direção de uma borboleta, à velocidade $v_m = 9$ m/s, enquanto a borboleta voa na sua direção, à velocidade $v_b = 8$ m/s. O morcego emite, pelas narinas, ondas ultra-sônicas de frequência

Velocidades Supersônicas

O primeiro artefato feito pelo homem capaz de atingir velocidades supersônicas foi o chicote¹¹⁷. Se a fonte se move a uma velocidade supersônica, $v_f > v$, temos um **Cone de Mach** (em três dimensões), cuja superfície representa a onda de choque e o ângulo de abertura é

$$\sin \theta = \frac{v}{v_f},$$

onde v_f/v é o **número de Mach**.



Obviamente nada é ouvido até que a fonte passe pelo detector, pois ela vem à frente das ondas. Depois de ser atingido pelo cone (e por um som de explosão), dois sons chegam ao detector. A medida que a fonte se afasta, os sons que continuam a ser emitidos chegam com uma frequência dada pela Eq. (109) e o sinal positivo. Mas também as ondas que foram emitidas antes da fonte passar são detectadas. Essas ondas atrasadas têm frequência negativa, dada pela Eq. (109) com o sinal negativo. Prevista por Lord Rayleigh, a interpretação para $f < 0$ é que são ouvidas de trás pra diante.

¹¹⁶A velocidade é obtida pelo efeito Doppler, e a distância pelo eco.

¹¹⁷O primeiro avião a romper a barreira do som foi o Bell X-1, pilotado por Chuck Yeager (1947). O primeiro veículo terrestre foi o ThrustSSC (1997).