

محاضرات مادة الفيزياء /1/
لطلاب السنة الأولى
(ميكاترونكس – معلوماتية)

الأستاذ الدكتور جبور نوفل جبور

2024 - 2023

جَامِعَة
الْمَنَارَة
MANARA UNIVERSITY

المحاضرة الرابعة
الصوت (الأمواج الصوتية)
Sound (Sound Waves)

- 1- مقدمة - Introduction
- 2- تغيرات الضغط في الأمواج الصوتية – Pressure variations in sound waves
- 3- سرعة الأمواج الصوتية – Speed of sounds waves
- 4- شدة الأمواج الصوتية الدورية – Intensity of periodic sounds waves
- 5- مفعول دوبلر – The Doppler effect

1- مقدمة – Introduction

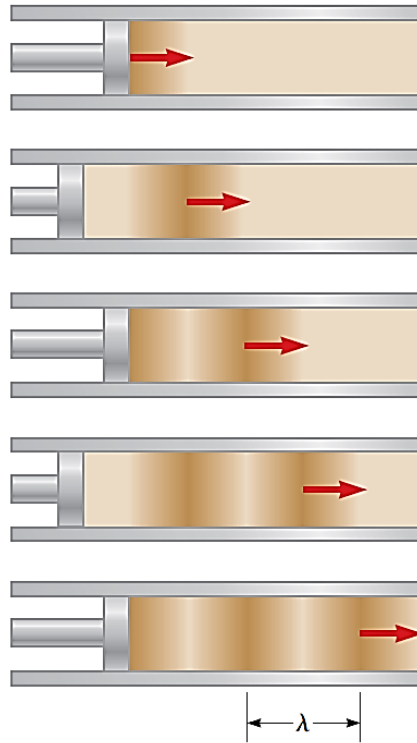
تُقسم الأمواج الصوتية إلى ثلاثة أنواع تغطي مختلف مراتب مجالات الترددات:

- (1) الأمواج السمعية (Audible).
- (2) الأمواج ما تحت السمعية (Infrasonic).
- (3) الأمواج ما فوق السمعية أو ما فوق الصوتية (Ultrasonic or Supersonic).

2- تغيرات الضغط في الأمواج الصوتية – Pressure variations in sound waves

يبين الشكل المرفق انتشار موجية طولية عبر أنبوب مملوء بغاز. إن منبع لموجة هو مكبس مهتز من

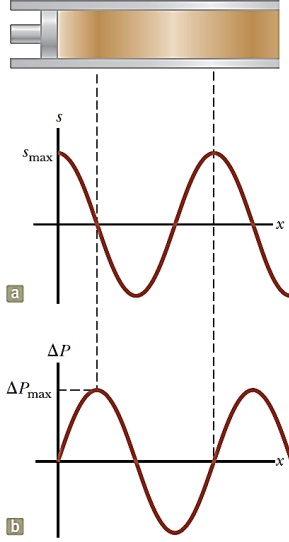
اليسار.



يمكننا أن نعبر عن تابع الموضع التوافقي بالشكل الآتي:

$$s(x, t) = s_{max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\Delta P = \Delta P_{max} \sin(kx - \omega t)$$



يبين الشكل:

(a) انتقال سعة (انتقال الموضع)، (b) سعة الضغط بتابعية الموضع لموجة جيبية طولية.

3- سرعة الأمواج الصوتية – Speed of sounds waves

سرعة الصوت (الموجة الصوتية) في غاز:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1)$$

نلاحظ أن سرعة الموجة v يتعلق بخاصية مرونة الوسط (معامل الحجم B)، وبالخاصية العطالية للوسط (الكثافة الحجمية ρ). في الواقع، سرعة الأمواج الميكانيكية تُعطى بالشكل العام، بالعلاقة التالية:

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastic property}}{\text{inertial property}}} = \sqrt{\frac{\text{خاصية المرونة}}{\text{خاصية العطالة}}}$$

وفي الجدول المرفق نقارن سرعة الموجية الصوتية في غاز مع سرعة الموجة على حبل:

$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$	$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$
سرعة الأمواج الصوتية (الطولية) في غاز معامل الحجم B و الكثافة الحجمية للغاز ρ	سرعة الأمواج العرضية على حبل T توتر (شد) الحبل، و μ الكثافة الخطية للحبل (لمادة الحبل)

والجدول المرفق يُعطي سرعة الصوت في بعض الأوساط المختلفة.

سرعة الصوت في بعض الأوساط المختلفة.

Speed of sound in various media

الوسط	السرعة	الوسط	السرعة	الوسط	السرعة
Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)
Gases		Liquids at 25°C		Solids^a	
Hydrogen (0°C)	1 286	Glycerol	1 904	Pyrex glass	5 640
Helium (0°C)	972	Seawater	1 533	Iron	5 950
Air (20°C)	343	Water	1 493	Aluminum	6 420
Air (0°C)	331	Mercury	1 450	Brass	4 700
Oxygen (0°C)	317	Kerosene	1 324	Copper	5 010
		Methyl alcohol	1 143	Gold	3 240
		Carbon tetrachloride	926	Lucite	2 680
				Lead	1 960
				Rubber	1 600

ونشير هنا إلى أن سرعة الصوت تتعلق أيضاً بدرجة حرارة الوسط. من أجل صوت ينتشر في الهواء (أو عبر الهواء)، فالعلاقة بين سرعة الصوت ودرجة الحرارة هي:

$$v = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{T}{273 K}} \quad (2)$$

حيث $\left(331 \frac{m}{s}\right)$ سرعة الصوت في هواء درجة حرارته صفر مئوية $(0^\circ C)$ ، و T درجة الحرارة المطلقة مقدره بالكلفين (Kelvin). باستخدام تلك العلاقة، فإن سرعة الصوت في هواء درجة حرارته $(293 K)$ (درجة حرارة الغرفة) تساوي:

$$v = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{293 K}{273 K}} \cong 343 \left(\frac{m}{s}\right)$$

سؤال:

أي من الحالات الآتية ستزيد سرعة الصوت في الهواء؟

- تناقص درجة حرارة الهواء،
- تزايد تردد (تواتر) الصوت،
- تزايد درجة حرارة الهواء،
- تزايد سعة الموجة الصوتية،
- تناقص ضغط الهواء.

تمرين: (انفجار فوق طبقة جليدية فوق المحيط، ومن ثم حساب زمن سفر الصوت في أوساط متنوعة)

حدث انفجار على ارتفاع 275 متر من طبقة جليدية سماكتها (867 m) فوق مياه المحيط. بفرض أن درجة حرارة الهواء تساوي ($-7,00^{\circ}C$)، ما هو الزمن اللازم للصوت لكي يقطع مسافة قدرها (1250 m) في مياه المحيط تحت طبقة الجليد؟ نعتبر كثافة ودرجة حرارة الجليد مقداران ثابتان. نفرض أن عامل الحجم للجليد B_{ice} يساوي إلى: ($B_{ice} = 9,2 \times 10^9 Pa$)، وكثافة الجليد تساوي ($\rho_{ice} = 917 kg/m^3$).

تمرين:

لهذه الغاية لنحسب سرعة الصوت في هواء درجة حرارته ($-7,00^{\circ}C$)، وهذا يكافئ درجة حرارة ($273 - 7 = 266 K$) مقدرة بالكلفين:

$$v_{air} = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{T}{273 K}} = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{\frac{266 K}{273 K}} \cong 327 \left(\frac{m}{s}\right)$$

ولنحسب الآن الزمن اللازم لكي يقطع الصوت مسافة 275 متر في الهواء:

$$t_{air} = \frac{d}{v_{air}} = \frac{275 m}{327 (m/s)} \cong 0,841 s$$

ولنحسب الآن سرعة الصوت في الجليد، وذلك باستخدام العلاقة:

$$v_{ice} = \sqrt{\frac{B_{ice}}{\rho_{ice}}} = \sqrt{\frac{9,2 \times 10^9 Pa}{917 kg/m^3}} \cong 3,2 \times 10^3 \left(\frac{m}{s}\right)$$

ولنحسب الآن الزمن اللازم لكي يقطع الصوت الطبقة الجليدية التي سماكتها 867 متر في الهواء:

$$t_{ice} = \frac{d}{v_{ice}} = \frac{867 m}{3200 (m/s)} \cong 0,27 s$$

ولنحسب الآن الزمن اللازم لكي يقطع الصوت الطبقة المائية التي سماكتها 1250 متر تحت الطبقة الجليدية:

$$t_{water} = \frac{d}{v_{water}} = \frac{1250 m}{1533 (m/s)} \cong 0,815 s$$

ومجموع الأزمان الثلاث السابقة يُعطي الزمن الكلي لانتشار الصوت:

$$t_{tot} = t_{air} + t_{ice} + t_{water} = 0,841 s + 0,27 s + 0,815 s \cong 1,93 s$$

ملاحظة:

نلاحظ مما سبق أن:

ملاحظة:

نلاحظ مما سبق أن:

- (1) سرعة الصوت في الجليد الصلب هي الأكبر،
 - (2) يلها سرعة الصوت في الماء السائل،
 - (3) ومن ثم يلها سرعة الصوت في الهواء.
- ونشير هنا أيضاً كما رأينا سابقاً أن سرعة الصوت تتعلق بدرجة الحرارة، والأجوبة ستتغير إذا كنا نعلم درجة حرارة الجليد والماء. وعلى سبيل المثال في الدرجة صفر مئوية ($0^{\circ}C$)، سرعة الصوت في مياه المحيط تصبح ($1449 m/s$)، أي أنها تتناقص.

سؤال:

هل سرعة الصوت في الكاوتشوك أكبر أو أصغر مما هي عليه في الألمنيوم؟ اشرح.

تمرين:

- المطلوب حساب سرعة الصوت في المواد الآتية في درجة الحرارة ($273 K$). أي في درجة الحرارة الصفر مئوي لكل من:
- (1) الرصاص ($B_{lead} = 1,6 \times 10^{10} Pa$)، (2) الزئبق ($B_{mercury} = 2,8 \times 10^{10} Pa$)، والهواء في الدرجة ($15^{\circ}C$). بفرض أن الكثافة الحجمية لكل من الرصاص والزئبق هي على التوالي: ($\rho_{mercury} = 13545 kg/m^3$) و ($\rho_{lead} = 11350 kg/m^3$)

الأجوبة: (1) ($\cong 1200 m/s$)، (2) ($\cong 1400 m/s$)، (3) ($\cong 322 m/s$).

4- شدة الأمواج الصوتية الدورية – Intensity of periodic sounds waves

تعريف:

إن شدة موجة صوتية دورية هي الاستطاعة بوحدة المساحة، وتُعطى بالعلاقة التالية:

Definitions

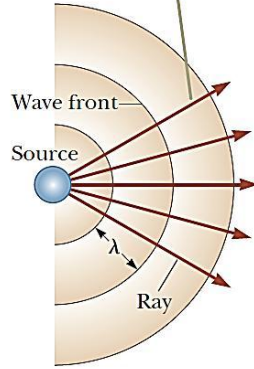
The intensity of a periodic sound wave, which is the power per unit area, is

$$I = \frac{(Power)_{average}}{A} = \frac{(\Delta P_{max})^2}{2\rho v}$$

من أجل موجة كروية مساحتها $A = 4\pi r^2$ (مساحة كرة) يكون لدينا:

$$I = \frac{(Power)_{average}}{A} = \frac{(Power)_{average}}{4\pi r^2} \quad (3)$$

The rays are radial lines pointing outward from the source, perpendicular to the wave fronts.



Spherical waves emitted by a point source.

The circular arcs represent the Spherical wave fronts that are concentric with the source

موجة كروية صادرة من منبع نقطي. الأقواس الدائرية تمثل جهات الموجة الكروية التي مركزها المنبع النقطي.

ويُعرف مستوى الصوت لموجة صوتية بالعلاقة التالية:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (4)$$

حيث إنَّ الثابت I_0 يساوي:

$$I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

وهو عبارة عن شدة مرجعية، وعادة تؤخذ مساوية لعتبة السمع، و I شدة الموجة الصوتية مقدرة بالواط على المتر المربع.

في هذا السلم، فإن عتبة الألم تساوي:

$$I = 1,00 \text{ W/m}^2$$

الموافقة لصوت ذات المستوى:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{1,00 \text{ W/m}^2}{1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log(10^{12}) = 10 \times 12 \times 1 = 120 \text{ dB}$$

وعتبة السمع توافق:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2}{1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log(1) = 10 \times 0 = 0 \text{ dB}$$

ويبين الجدول المرفق مستويات الصوت لمنايع متنوعة.

مستويات الصوت - Sound levels

Source of sound – منبع الصوت	β (dB)
------------------------------	--------------

Nearby jet airplane	قريب من صوت طائرة نفاثة	150
Jackhammer	آلة حفر الصخور	
Machine gun	رشاش: مدفع إلكتروني صغير	130
Siren	صفارة الإنذار	120
Rock concert	حفلة روك (حفلة رقص)	
Subway	القطار الكهربائي النفقي	100
Power lawn mower	آلة لجز العشب	
Busy traffic	حركة سير نشيطة مزدحمة	80
Vacuum cleaner	مكنسة كهربائية	70
Normal conversation	محادثة عادية	60
Mosquito buzzing	طنين أو أزيز البعوضة	40
Whisper	همس	30
Rustling leaves	حفيف أوراق النباتات	10
Threshold of hearing	عتبة السمع	0

ملاحظة:

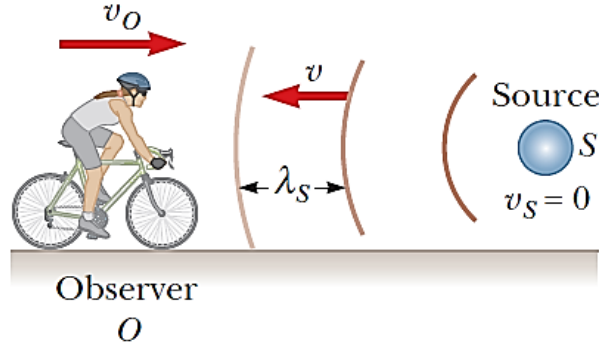
نشير إلى أن الكائن البشري حساس للترددات التي تقع في المجال:
(20 Hz – 20 000 Hz)

5- مفعول دوبلر – The Doppler effect

نعلم أن صوت سيارة تُصدر إشارة إنذار (صفير أو ما شابه) يتغير بتأثير حركتها وبعدها عنك. إن تردد الصوت الذي نسمعه عند اقتراب السيارة منا يكون أعلى من التردد عندما تبتعد السيارة عنا. وهذه التجربة هي أحد الأمثلة على "مفعول دوبلر".

حالة 1: (مراقب يتحرك بالنسبة لمنع ساكن لا يتحرك)

يبين الشكل المرفق مراقب يتحرك بسرعة v_0 باتجاه المنبع S (المعتبر منبع نقطي)، الذي هو في حالة السكون، أي أن سرعته v_s تساوي الصفر ($v_s = 0$).



يبين الشكل مراقب يتحرك بسرعة v_0 باتجاه المنبع S (المعتبر منبع نقطي) الساكن ($v_s = 0$).
 المراقب يسمع تردد f_0 أكبر من تردد المنبع f_s .

نرمل لتواتر (تردد) المنبع الصوت بـ f_s ، وطول الموجة لهذا المنبع بـ λ_s ، وسرعة الصوت في الهواء بـ v . إذا كل من المنبع والمراقب ساكنين لا يتحركان، فإن المراقب سيكتشف (سيسجل) التردد f_s الموافق لجهات الموجة بالثانية، أي أنه في هذه الحالة يكون ($v_0 = 0$) و ($v_s = 0$). ومنه فإن التردد الذي يكشفه المراقب (الذي يسمعه) f_0 يساوي تردد المنبع الصوتي f_s ، أي أن $f_0 = f_s$. وعندما يتحرك المراقب باتجاه المنبع، فإن المراقب يتحرك مسافة قدرها ($v_0 t$) خلال زمن قدره t الثانية. خلال هذه الفترة أو خلال هذا المجال، المراقب يكتشف عدد إضافي من جهات الموجة. هذا العدد الإضافي من جهات الموجة يساوي إلى المسافة المجتازة أو المقطوعة، أي ($v_0 t$)، مقسوماً على طول الموجة λ_s :

$$\text{العدد الإضافي المكتشف من جهات الموجة} = \frac{v_0 t}{\lambda_s}$$

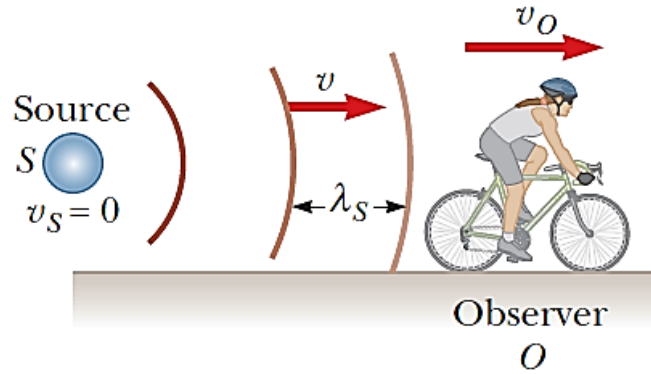
وإذا قسمنا المعادلة السابقة على الزمن t نحصل على العدد الإضافي المكتشف من جهات الموجة (v_0/λ_s). ومنه، فإن التردد المسموع من قبل المراقب يزداد ويصبح:

$$f_0 = f_s + \frac{v_0}{\lambda_s}$$

وباستبدال ($\lambda_s = v/f_s$) في العلاقة السابقة التي تعطي f_0 نحصل على:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v + v_0}{v} \right) \quad (5)$$

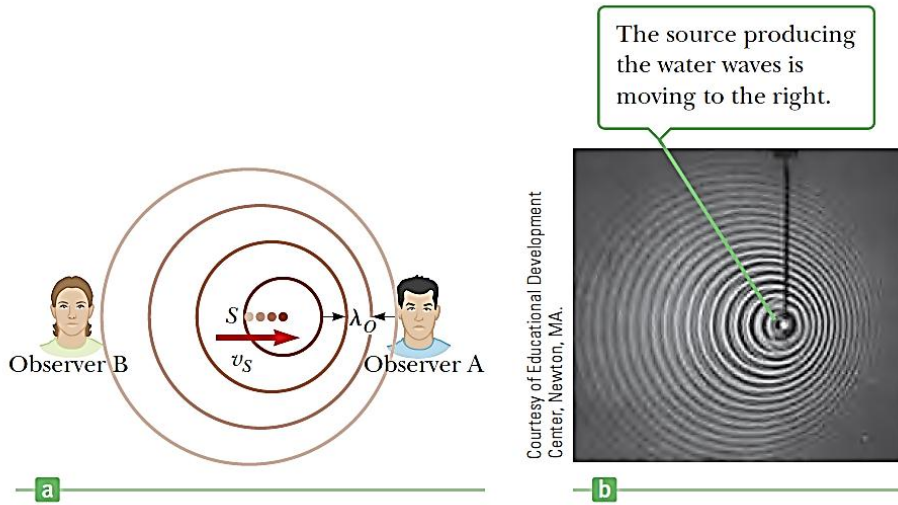
وفي حالة المراقب يتحرك مبتعداً عن المنبع، انظر الشكل المرفق، فإن التردد الذي يسمعه المراقب يتناقص. وفي هذه الحالة يمكن استخدام العلاقة السابقة ولكن هذه المرة نعتبر السرعة v_0 سالبة، أي نأخذ ($v - v_0$) بدلاً من ($v + v_0$). إذاً عندما يبتعد المراقب عن المنبع نستبدل (v_0) بـ ($-v_0$) في العلاقة السابقة.



يبيّن الشكل مراقب يتحرك بسرعة v_o مبتعداً عن المنبع S (المعتبر منبع نقطي) الساكن ($v_s = 0$).
 المراقب يسمع تردد f_o أصغر من تردد المنبع f_s .

حالة 2: (منبع صوتي يتحرك بالنسبة لمراقب ساكن لا يتحرك)

يبيّن الشكل المرفق منبع صوتي S يتحرك بسرعة v_s باتجاه مراقب ساكن. كما هو موضح بالشكل فإن جهات الموجة تقترب من المراقب الساكن A ، وتبتعد عن المراقب الساكن الآخر B .



(a) يبيّن الشكل المرفق منبع صوتي S يتحرك بسرعة v_s بحيث يقترب من المراقب الساكن A ، ويبتعد عن المراقب الساكن الآخر B . منبع يولد أمواج مائبة تتحرك نحو اليمين. (b) مفعول دوبلر في الماء. منبع يولد أمواج في الماء تتحرك نحو اليمين.

وكنتيجة لذلك فإن طول الموجة λ_0 الصادرة عن المنبع الصوتي S ، المقاسة من قبل المراقب الساكن أقصر من طول الموجة λ_s الصادرة عن المنبع الساكن. خلال فترة زمنية نسميها الدور T ، فإن المنبع المتحرك يقطع مسافة تساوي:

$$v_s T = \frac{v_s}{f_s}$$

وطول الموجة يكون أقصر بالمقدار السابق. وطول الموجة الملاحظ أو المقاس يُعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda_0 = \lambda_s - \frac{v_s}{f_s}$$

وذلك لأن $\lambda_s = \frac{v}{f_s}$ ، وبالتالي فإن المراقب الساكن A ، يسمع التردد المعطى بالعلاقة:

$$\lambda_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda_s - \frac{v_s}{f_s}} = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s}}$$

أو أن:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v}{v - v_s} \right) \quad (6)$$

وكما هو متوقع، التردد المقاس أو المكشوف أو المسموع يتزايد عندما يتحرك المنبع باتجاه المراقب. وعندما يبتعد المنبع عن المراقب الساكن، فيجب استبدال الإشارة السالبة في المقام بالإشارة الموجبة، حيث العامل $(v - v_s)$ يصبح $(v + v_s)$.

الحالة العامة: (منبع ومراقب يتحركان بالنسبة للأرض)

عندما يكون لدينا كل من المنبع والمراقب يتحركان بالنسبة للأرض، فباستخدام العلاقات السابقة

نستنتج أن:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v + v_0}{v - v_s} \right) \quad (7)$$

وفي العلاقة السابقة، فإن إشارة كل من v_0 و v_s تتعلق باتجاه السرعات. عندما يتحرك المراقب باتجاه المنبع، فإن إشارة v_0 تكون موجبة، وعندما يتحرك المراقب مبتعداً عن المنبع، فإن إشارة v_0 تكون سالبة. وبطريقة مشابهة بالنسبة للسرعة v_s . عندما يتحرك المنبع باتجاه المراقب، فإن إشارة v_s تكون موجبة، وعندما يتحرك المنبع مبتعداً عن المراقب، فإن إشارة v_s تكون سالبة.

ملاحظة:

إن الاختيار غير الصحيح للإشارة يؤدي إلى مشاكل في مفعول دوبلر. إن القاعدة التي يجب أن نتبعها هي: كلمة اقتراب يجب أن تكون مرافقة لمفهوم تزايد التردد المراقب (المسموع)، وكلمة ابتعاد يجب أن مرافقة لمفهوم تناقص التردد المراقب (المسموع).

إن مفعول دوبلر هو أكثر لحظاً بالنسبة للأمواج الصوتية، وهو مفعول مشترك بالنسبة لكل الأمواج. على سبيل المثال، إن الحركة النسبية لمنبع ومراقب يقود إلى انزياح التردد في الأمواج الضوئية. يُستخدم مفعول دوبلر من قبل شرطة السير في أنظمة الرادار لقياس سرعات السيارات. يُستخدم أيضاً في علم الفلك لتحديد سرعات النجوم، الكواكب، وأجسام سماوية أخرى بالنسبة للأرض.

تمرين: (دراسة انزياح دوبلر من أجل منبع متحرك)

قطار يتحرك بسرعة تساوي (40 m/s) . تردد (تواتره) صوت صفارة القطار يساوي $(5,00 \times 10^2 \text{ Hz})$. المطلوب تحديد التواتر (التردد) المسموع من قبل مراقب ساكن وذلك عند اقتراب القطار منه. نفرض أن درجة حرارة الجو تساوي $(24,0^\circ \text{ C})$.

الحل:

لنحسب أولاً سرعة الصوت في الهواء بدرجة حرارة $(24,0^\circ \text{ C})$ وذلك باستخدام العلاقة:

$$v_{air} = \left(331 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} = \left(331 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \sqrt{\frac{(273 + 24,0) \text{ K}}{273 \text{ K}}} \cong 345 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

وبما أن المراقب ساكن لا يتحرك فإن سرعته معدوم $v_0 = 0$. القطار يتحرك باتجاه المراقب، فسرعته تساوي (40 m/s) وتُعتبر موجبة. باستبدال هذه القيم وسرعة الصوت في العلاقة التي تسمح بحساب انزياح دوبلر نجد:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v + v_0}{v - v_s}\right) = (5,00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{345 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) \cong 566 \text{ Hz}$$

ملاحظة:

إذا كان القطار يبتعد عن المراقب فإن سرعته تُعتبر سالبة، أي أن $(v_s = -40 \text{ m/s})$.

تمرين: (دراسة انزياح دوبلر من أجل منبع ومراقب يتحركان)

سيارة اسعاف تسيّر بسرعة $v_s = 75,0 \text{ mi/h}$ ، صفارة الإسعاف تُصدر صوت تردده يساوي $4,00 \times 10^2 \text{ Hz}$. ما هو التردد الذي يسمعه مسافر في سيارة تسيّر بسرعة $v_0 = 55,0 \text{ mi/h}$ في الحالتين الآتيتين: (1) عند الاقتراب؟ (2) عند الابتعاد؟ بفرض أن سرعة الصوت في الهواء تساوي 345 m/s .

الحل:

لنحول السرعات من الميل بالساعة إلى المتر بالثانية:

$$v_s = \left(75,0 \frac{mi}{h}\right) \left(\frac{0,447 \frac{m}{s}}{1,00 \frac{mi}{h}}\right) \cong 33,5 \frac{m}{s}$$

$$v_0 = \left(55,0 \frac{mi}{h}\right) \left(\frac{0,447 \frac{m}{s}}{1,00 \frac{mi}{h}}\right) \cong 24,6 \frac{m}{s}$$

(1) عند الاقتراب:

لنقارن التردد الملاحظ مع التردد البدائي الصادر. إن كل من العربتين تقتربان من بعضهما البعض، وبالتبديل بقيمة كل من قيمة $v_0 \cong +24,6 \frac{m}{s}$ وقيمة $v_s \cong +33,5 \frac{m}{s}$ في علاقة انزياح دوپلر نجد:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v + v_0}{v - v_s}\right) = (4,00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \frac{m}{s} + 24,6 \frac{m}{s}}{345 \frac{m}{s} - 33,5 \frac{m}{s}}\right) \cong 475 \text{ Hz}$$

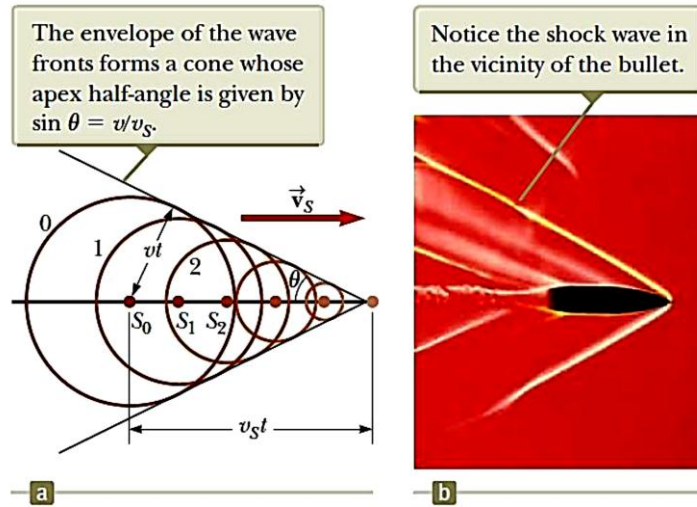
(2) عند الابتعاد:

لنقارن التردد الملاحظ مع التردد البدائي الصادر. إن كل من العربتين تبتعدان عن بعضهما البعض، وبالتبديل بقيمة كل من قيمة $v_0 \cong -24,6 \frac{m}{s}$ وقيمة $v_s \cong -33,5 \frac{m}{s}$ في علاقة انزياح دوپلر نجد:

$$f_0 = f_s \left(\frac{v + v_0}{v - v_s}\right) = (4,00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \text{ m/s} + (-24,6 \text{ m/s})}{345 \frac{m}{s} - (-33,5 \text{ m/s})}\right)$$

$$\cong 339 \text{ Hz}$$

مفهوم أمواج الصدم:



شكل يوضح مفهوم أمواج الصدم. وعدد ماخ.

إن غلاف جهات الموجة يشكل مخروط حيث نصف زاوية تلك المخروط تساوي:

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{v}{v_s} \quad (8)$$

حيث يُطلق على النسبة (v/v_s) بعدد ماخ – Mach number.

ونشير هنا إلى أن عدد ماخ هو عدد ليس له أبعاد (دون واحدة)، ويُرمز له بـ Ma . وهو يعبر عن النسبة بين سرعة جسم في مائع (المائع يمكن أن يكون غاز أو سائل) وسرعة الصوت في نفس المائع. إن سرعة الصوت في غاز تتغير بحسب أو مع طبيعة هذا المائع ودرجة حرارته. إن عدد ماخ لا يوافق سرعة ثابتة، إن يتعلق بالشروط المحلية (الموضعية). ونشير هنا أيضاً إلى أنه تم تسميته تكريماً للفيزيائي الفيلسوف النمساوي "ارنيست ماخ" "Ernest Mach".

وبالعودة إلى الشكل السابق، فإن جهة الموجة المخروطية تتولد عندما يكون $(v_s > v)$ (السرعات ما فوق الصوتية) (supersonic speeds) التي تُعرف بـ "موجة الصدم (shock wave)". إن الطائرات النفاثة التي سرعتها تتجاوز سرعة الصوت، أي ما فوق الصوتية (supersonic speeds) تولد موجات صدم، وهذه الأمواج هي المسؤولة عن الأصوات المرتفعة والمزعجة التي نسمعها، أو ما يشبه الانفجارات "sonic boom". تحمل موجة الصدم طاقة كبيرة متمركزة على سطح المخروط، والتي تقود إلى تغيرات كبيرة في الضغط. إن مثل هذه الأمواج من الصدم هي أمواج غير مرغوب بها للسمع، حيث يمكن أن تُسبب أضراراً في الأبنية عندما تسير هذه الطائرات النفاثة على ارتفاعات منخفضة. ونشير هنا إلى أن الطائرات التي تسير بسرعات ما فوق الصوتية تُحدث أو تولد انفجارين لأنه يتشكل أمواج صدم عند المقدمة وعند الذيل.



إن الموجة المشكّلة ذات الشكل V الناتجة عن ر مقدمة المركب سببها أن سرعة المركب أكبر من سرعة أمواج الماء المتولدة. إن انحناء (تقوس) الموجة مشابه لموجة الصدم المشكّلة (الناتجة) بواسطة طائرة تسير بسرعة أكبر من سرعة الصوت

شكل يوضح مفهوم أمواج الصدم في الماء.

سؤال:

طائرة تطير بسرعة ثابتة وتنتقل من جو بارد (هواء بارد) إلى جو حار (هواء حار)، هل عدد ماخ: (1) يتزايد، (2) يتناقص، أو (3) يبقى ثابتاً؟

الجواب:

الجواب هو الخيار الثاني (2).

إن سرعة الصوت تزداد في الهواء الحار (درجة الحرارة تزيد سرعة الصوت)، بينما سرعة الصوت الصادر عن المنبع (الطائرة) v تبقى ثابتة. إذاً، فالنسبة (v/v_s) بين سرعة الصوت الصادر عن المنبع v على سرعة الصوت في الجو الحار v_s ، التي تمثل عدد ماخ، يتناقص.

مثال:

ما هو عدد ماخ لطائرة تسير بسرعة 230 m/s علماً أن درجة الحرارة تساوي -42°C ؟

الحل:

بحسب تعريف عدد ماخ فإن هذا العدد يساوي:

$$Ma = \frac{v}{v_s}$$

لهذه الغاية لنحسب سرعة الصوت في هواء درجة حرارته $(-42,00^\circ \text{C})$ ، وهذا يكافئ درجة حرارة $(273 - 42 = 231 \text{ K})$ مقدرة بالكلفين:

$$v_{air(-42,00^\circ \text{C})} = \left(331 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} = \left(331 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \sqrt{\frac{(273 - 42) \text{ K}}{273 \text{ K}}}$$

$$\cong 304 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

حيث أن سرعة الصوت في الدرجة صفر مئوية تساوي $\left(331 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ ، فيكون عدد ماخ يساوي:

$$Ma = \frac{v}{v_{air(-42,00^\circ \text{C})}} = \frac{230 \text{ m/s}}{304 \text{ m/s}} \cong 0,76$$

ملاحظة:

إذا كان عدد ماخ يساوي الواحد فإن سرعة الجسم تساوي سرعة الصوت في الوسط المدروس $v_s = v$. وإذا كان عدد ماخ يساوي 2 مثلاً فإن سرعة الجسم تساوي لضعف سرعة الصوت في الوسط المدروس $v = 2v_s$.

