مفعول دوبلر

The Doppler Effect

مقدمة (Introduction):

موضع هذا الفصل هو مفعول دوبلر، سوف نقدم الحالات المختلفة لمفعول دوبلر عندما يكون كل من المنبع الصوتي والمستمع (المتلقي) في حالة حركة بالنسبة لبعضهما البعض في الهواء. وسوف يحتوي هذا الفصل على عدد من الأمثلة المحلولة وعدد من المسائل غير المحلولة.

1.8 مفعول دوبلر (The Doppler Effect)

ربما لاحظت أنه عندما تقترب منك سيارة وصوت بوقها في حالة العمل، فيبدو أن طبقة الصوت (التواتر) تنخفض مع مرور السيارة. هذه الظاهرة، التي وصفها لأول مرة العالم النمساوي كريستيان دوبلر في القرن التاسع، تسمى **مفعول دوبلر**.

عندما يكون المصدر (المنبع) الصوتي والمستمع في حالة حركة بالنسبة لبعضهما البعض، فإن تواتر الصوت الذي يسمعه المستمع لا يكون هو نفسه تواتر المصدر.

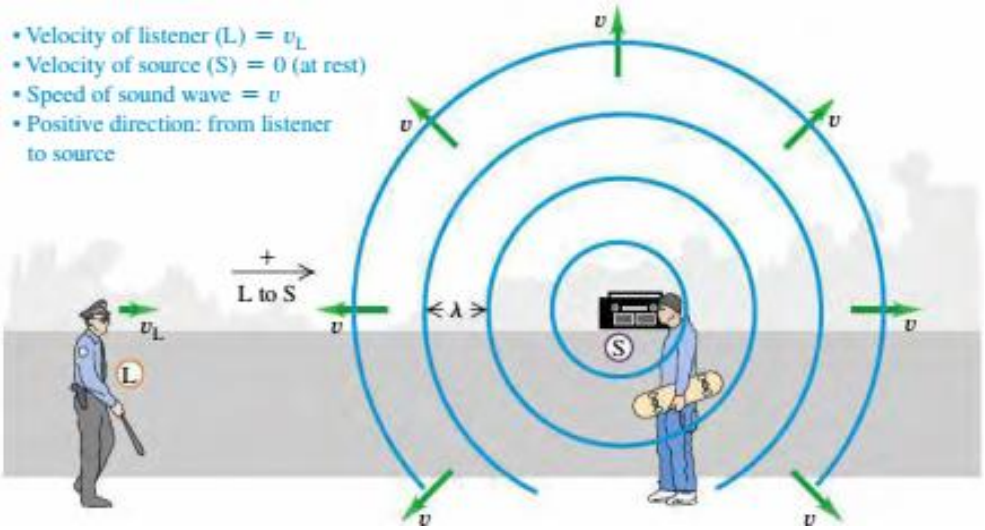
لتحليل مفعول دوبلر للصوت، سنعمل على إيجاد علاقة بين انزياح التواتر وسرع كل من المصدر والمستمع بالنسبة إلى الوسط (عادة الهواء) الذي تنتشر من خلاله الأمواج الصوتية.

لتبسيط الأمور، نأخذ في الاعتبار فقط الحالة الخاصة التي تقع فيها سرعة كل من المصدر والمستمع على طول الخط الذي يربط بينهما.

لتكن v_S مركبة السرعة للمصدر و v_L هي مركبة السرعة للمستمع على طول هذا الخط (الخط الواصل بينهما). نختار الاتجاه الموجب لكل من v_S و v_L ليكون الاتجاه من المستمع L إلى المصدر S. وتكون سرعة الصوت بالنسبة إلى الوسط ، v ، موجبة دائماً.

1.1.8 المستمع متحرك والمصدر ثابت (Moving Listener and Stationary Source)

لنفكر أولاً في أن المستمع L يتحرك بسرعة v_L باتجاه مصدر صوتي ثابت S. يصدر المصدر موجة صوتية بتواتر f_S ويعطى طول الموجة بالعلاقة $\lambda = v/f_S$. يوضح الشكل 1.8 عدة قمم موجية مفصولة بمسافة متساوية λ.



الشكل 1.8: المستمع الذي يتحرك نحو مصدر ثابت يسمع تواتراً أعلى من التواتر عندما يكون المستمع ثابتاً. هذا لأن السرعة النسبية للمستمع والموجة أكبر من سرعة الموجة v.

تملك القمم الموجية التي تقترب من المستمع المتحرك سرعة انتشار بالنسبة للمستمع ($v + v_L$). لذا فإن التواتر f_L (التواتر الذي يسمعه المستمع) هو:

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v / f_S} \qquad \textbf{(1.8)}$$

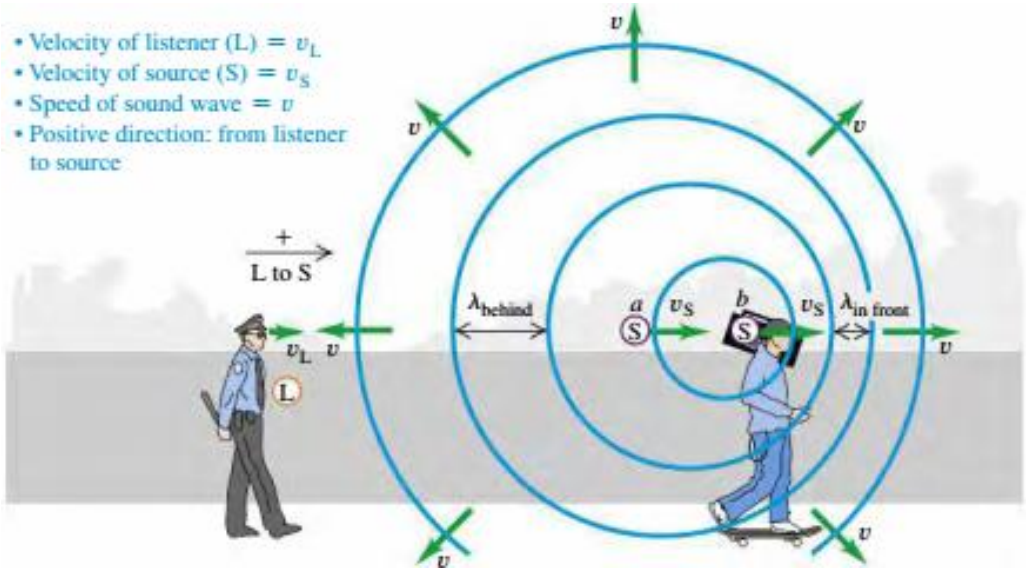
$$f_L = \left(\frac{v + v_L}{v} \right) f_S = \left(1 + \frac{v_L}{v} \right) f_S \qquad \textbf{(2.8)}$$

(moving listener, stationary source)

لذا فإن المستمع الذي يتحرك نحو مصدر صوتي ($v_L>0$) يسمع تواتراً أعلى (نغمة أعلى) مما يفعله المستمع الثابت. بينما المستمع الذي يبتعد عن المصدر ($v_L<0$) يسمع تواتراً أقل (نغمة أقل) من المستمع الثابت.

1.1.8 المستمع متحرك والمصدر متحرك (Moving Source and Moving Listener)

بفرض أن المصدر يتحرك أيضًا بسرعة v_S (الشكل 2.8). سرعة الموجة بالنسبة إلى وسط الانتشار (الهواء) لا تزال v؛ والتي تتحدد من خلال خصائص الوسط ولا تتغير بحركة المصدر. ولكن طول الموجة لم يعد يساوي v/f_S.



الشكل 2.8: تتجمع القمم الموجية الصادرة من مصدر يتحرك من ***a*** إلى ***b*** معاً أمام المصدر (إلى يمين هذا المصدر) وتمتد خلفه (إلى يسار هذا المصدر).

أن زمن إصدار دورة واحدة للموجة يدعى بالدور $1/f_s$. خلال هذا الزمن، تنتقل الموجة مسافة $vT = v / f_s$ ويتحرك المصدر مسافة $v_s T = v_s / f_s$. أن طول الموجة هو المسافة بين قمم الموجة المتتالية، ويتم تحديد ذلك من خلال الإزاحة النسبية للمصدر والموجة.

كما يوضح الشكل 2.8، تختلف هذه الإزاحة أمام المصدر وخلفه. في المنطقة على يمين المصدر في الشكل2.8 (أي أمام المصدر)، يكون طول الموجة هو:

$$\lambda_{\text{in front}} = \frac{v}{f_S} - \frac{v_S}{f_S} = \frac{v - v_S}{f_S} \qquad \textbf{(3.8)}$$

(wavelength in front of a moving source**)**

أما في المنطقة على يسار المصدر (خلف المصدر):

$$\lambda_{\text{behind}} = \frac{v + v_S}{f_S} \qquad \textbf{(4.8)}$$

(wavelength behind a moving source**)**

أن الأمواج أمام وخلف المصدر تنضغط وتمتد، على التوالي، بواسطة حركة المصدر.

لإيجاد التواتر الذي يسمعه المستمع خلف المصدر، نعوض المعادلة 4.8 في الشكل الأول من المعادلة 1.8 فنجد:

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda_{\text{behind}}} = \frac{v + v_L}{(v + v_S) / f_S}$$

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S \qquad \textbf{(5.8)}$$

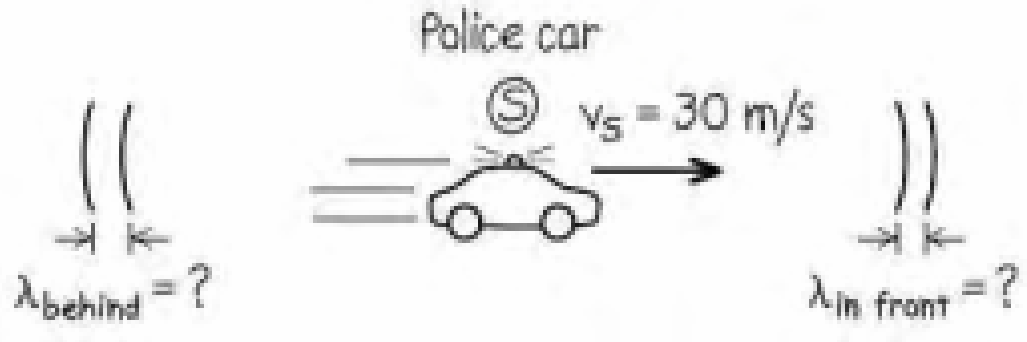
(Doppler effect, moving source and moving listener**)**

مثال 1.8: مفعول دوبلر I: الأطوال الموجية (Doppler effect I: Wavelengths)

تصدر صفارات الإنذار لسيارة الشرطة موجة جيبية بتواتر f_s = 300 Hz . حيث سرعة الصوت 340 m/s وفي حالة كون الهواء ساكن. والمطلوب:

(a) أوجد طول الموجة للأمواج إذا كانت صفارة الإنذار في حالة سكون.

(b) أوجد الأطوال الموجية للأمواج أمام وخلف صفارة الإنذار إذا كانت تتحرك بسرعة 30 m/s (الشكل 3.8).



الشكل 3.8: رسم توضيحي للمسألة.

الحل:

(a) في هذا الجزء لا يوجد مفعول دوبلر لأن لا المصدر ولا المستمع يتحرك بالنسبة بالهواء؛ فيمكن حساب طول الموجة من العلاقة:

$$\lambda = \frac{v}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.13\ \text{m}$$

(b) طول الموجة أمام صفارة الإنذار:

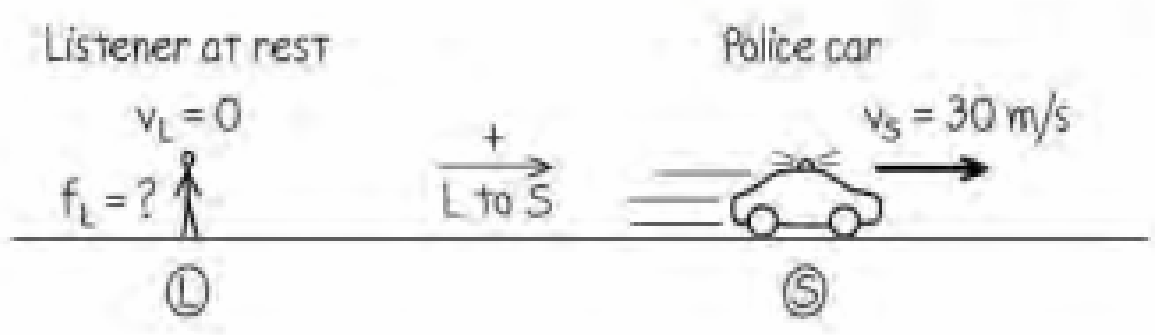
$$\lambda_{\text{in front}} = \frac{v - v_S}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s} - 30\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.03\ \text{m}$$

أما طول الموجة خلف صفارة الإنذار فيكون:

$$\lambda_{\text{behind}} = \frac{v + v_S}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s} + 30\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.23\ \text{m}$$

مثال 2.8: مفعول دوبلر II: التواترات (Doppler effect II: Frequencies)

إذا كان المستمع L في حالة سكون وكانت صفارة الإنذار في المثال 1.8 تبتعد عن L بسرعة 30 m/s (الشكل 4.8)، فما هو التواتر الذي يسمعه المستمع؟



الشكل 4.8: رسم توضيحي للمسألة.

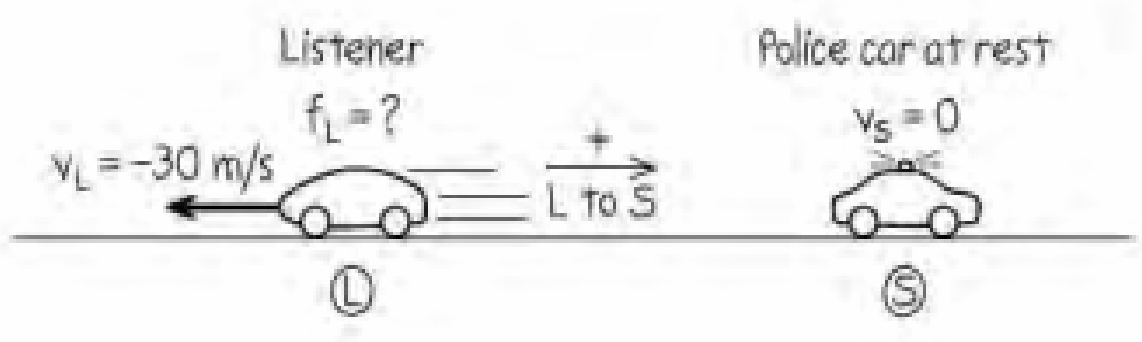
الحل:

المتغير المستهدف لدينا هو التواتر f_L الذي يسمعه المستمع خلف المصدر المتحرك. يوضح الشكل 4.8 الوضع حيث لدينا $v_L = 0$ و$v_S = +30$ m/s (موجب، لأن سرعة المصدر في الاتجاه من المستمع إلى المصدر). وبالتالي فالتواتر الذي يسمعه المستمع هو:

$$f_L = \frac{v}{v + v_S} f_S = \frac{340\ \text{m/s}}{340\ \text{m/s} + 30\ \text{m/s}} (300\ \text{Hz}) = 276\ \text{Hz}$$

مثال 3.8: مفعول دوبلر III: المستمع متحرك (Doppler effect III: A moving listener)

إذا كانت صفارة الإنذار في حالة سكون والمستمع يتحرك نحو اليسار بسرعة 30 m/s (الشكل 5.8) ، فما هو التواتر الذي يسمعه المستمع؟



الشكل 5.8: رسم توضيحي للمسألة.

الحل:

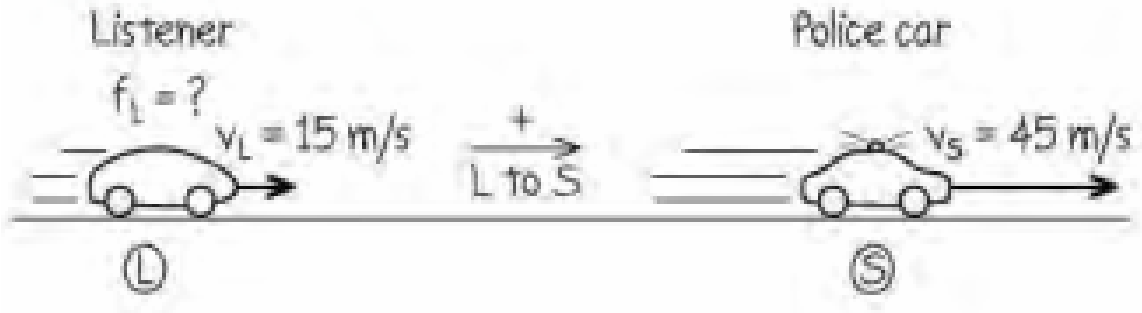
مرة أخرى، المتغير المستهدف لدينا هو f_L، ولكن الآن L في حالة حركة و S في حالة سكون. يوضح الشكل 5.8 الوضع. لدينا سرعة المستمع هي v_L = -30 m/s (سالب، لأن الحركة في الاتجاه من المصدر إلى المستمع). وبالتالي فالتواتر الذي يسمعه المستمع هو:

$$f_L = \frac{v + v_L}{v} f_S = \frac{340\ \text{m/s} + (-30\ \text{m/s})}{340\ \text{m/s}}(300\ \text{Hz}) = 274\ \text{Hz}$$

مثال 4.8: مفعول دوبلر IV: المستمع متحرك والمصدر متحرك:

Doppler effect IV: Moving source, moving listener:

لنفرض أن صفارة الإنذار تبتعد عن المستمع بسرعة 45 m/s بالنسبة للهواء، والمستمع يتحرك نحو صفارة الإنذار بسرعة 15 m/s بالنسبة للهواء (الشكل 6.8). ما هو التواتر الذي يسمعه المستمع؟



الشكل 6.8: رسم توضيحي للمسألة.

الحل:

الآن كلا من L و S في حالة حركة (الشكل 6.8). مرة أخرى المتغير المستهدف لدينا هو f_L. أن سرعة كل من المصدر v_S = +45 m/s وسرعة المستمع vL = +15 m/s موجبة لأن كلا السرعتين في الاتجاه من المستمع إلى المصدر. وبالتالي فالتواتر الذي يسمعه المستمع هو:

$$f_{\mathrm{L}} = \frac{v + v_{\mathrm{L}}}{v + v_{\mathrm{S}}} f_{\mathrm{S}} = \frac{340\ \mathrm{m/s} + 15\ \mathrm{m/s}}{340\ \mathrm{m/s} + 45\ \mathrm{m/s}} (300\ \mathrm{Hz}) = 277\ \mathrm{Hz}$$

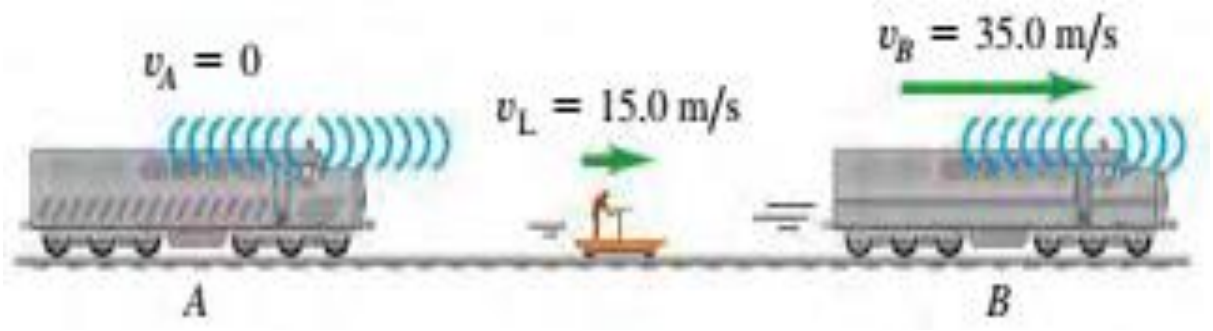
مسائل غير محلولة

1.8. ليكن لدينا صفارتا قطار، A و B ، تواتر كل منهما 392 Hz. A ثابت و B يتحرك نحو اليمين (بعيدًا عن A) بسرعة 35.0 m/s. يوجد المستمع بين الصافرتين ويتحرك نحو اليمين بسرعة 15.0 m/s (الشكل). لا يوجد حركة للهواء. والمطلوب:

(a) ما هو التواتر الصادر من A كما يسمعه المستمع؟

(b) ما هو التواتر الصادر من B كما يسمعه المستمع؟

(c) ما هو تواتر النبض الذي اكتشفه المستمع؟



2.8. (a) يتحرك مصدر صوتي والذي ينتج أمواج تواتراتها 1.00 kHz نحو مستمع ثابت بسرعة مقدارها نصف سرعة الصوت. ما هو التواتر الذي سيسمعه المستمع في هذه الحالة؟

(b) بفرض بدلاً من ذلك أن المصدر ثابت وأن المستمع يتحرك نحو المصدر بنصف سرعة الصوت. فما هو التواتر الذي يسمعه المستمع؟ كيف تجيب بالمقارنة مع ذلك في الجزء **(a)**؟ اشرح على أسس فيزيائية سبب اختلاف الإجابتين.

3.8. على الكوكب اراكيس (Arrakis) يطير طائر ذكر باتجاه زميلته بسرعة 25.0 m/s ويقوم أثناءها بالغناء بتواتر 1200 Hz. إذا كانت الأنثى الثابتة تسمع نغمة مقدارها 1240 Hz ، فما هي سرعة الصوت في جو اراكيس؟

4.8. يسير قطار سكة حديد بسرعة 25.0 m/s في الهواء الساكن. ليكن تواتر النغمة الصادرة من صافرة القاطرة هو 400 Hz. فما هو طول الموجة لأمواج الصوت:

(a) أمام القاطرة و

(b) خلف القاطرة؟

ما هو تواتر الصوت الذي يسمعه المستمع الثابت:

(c) أمام القاطرة و

(d) خلف القاطرة؟

**********نهاية الفصل الثامن**********