محاضرات مادة الفيزياء /1/

لطلاب السنة الأولى

(ميكاترونيكس – معلوماتية – عمارة)

الأستاذ الدكتور جبُّور نوفل جبُّور

2025 - 2024

المحاضرة الثالثة

حركة الموجة

Wave motion

1- مقدمة

2- انتشار الموجة

3- نموذج (موديل) تحليلي لوصف انتقال الموجة

4- سرعة الأمواج على الحبال

5- الانعكاس والنفوذية

1- مقدمة:

هناك الكثير من الأمثلة لحركة الموجة، فمثلاً عند سقوط نقطة ماء (أو عند رمي حصاة) في بركة ماء. عند اصطدام الحصاة مع سطح الماء يتولد أمواج دائرية تبتعد عن نقطة سقوط الحصاة أو نقطة الماء، انظر الشكل المرافق.

سقوط نقطة (قطرة) ماء (أو حصاة) في بركة ماء يسبب تموج (اهتزاز) سطح الماء.
يرافق هذه التموجات حركة أمواج دائرية تبتعد عن نقطة سقوط الحصاة أو قطرة الماء،

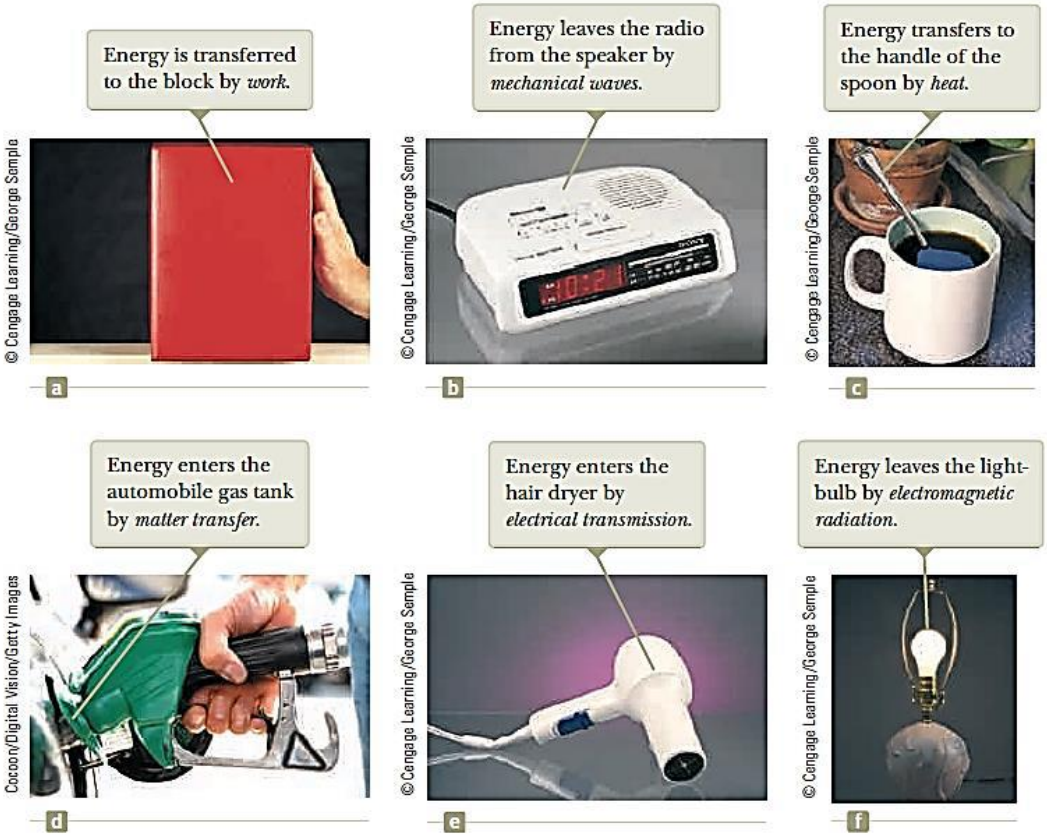
إن الموجة المتولدة تتحرك مبتعدة عن نقطة السقوط (نقطة المبدأ). الماء هنا يتحرك لا ينتقل مع حركة هذه الموجة.

إن العالم المحيط بنا مملوء بالأمواج، ومن الأمثلة النموذجية لهذا النوع من الأمواج نذكر **"الأمواج الميكانيكية" و"الأمواج الكهرطيسية"**.

لنعتبر الآن جسم صغير يطفو على سطح الماء، ولنفرض أننا حركنا هذا الجسم بشكل غير مباشر وذلك بإسقاط حصاة على سطح الماء بعيدة عن مكان تموضع الجسم الطافي. فهذا الجسم يكتسب طاقة حركية نتيجة انتقال الطاقة من نقطة سقوط الحصاة إلى مكان وجود الجسم. إن هذه الميزة تُعتبر مركزية وأساسية لحركة الموجة: تنتقل الطاقة مسافة ما، ولكن المادة لا تنتقل.

2- انتشار الموجة:

بينا في المقدمة أن النقطة الأساسية لحركة الموجة هي أن الطاقة تنتقل في الفضاء بينما المادة لا تنتقل. نشير إلى أن هناك آليتان لانتقال الطاقة: في حالة الأمواج الميكانيكية والأمواج الكهرطيسية (الإشعاع الكهرطيسي) فإن انتقال الطاقة يتعلق بالأمواج وليس بالمادة. بالمقابل، فإنه في الآلية الأخرى فإن المادة تنتقل، انتقال الطاقة يرافق حركة الموجة في الفضاء حيث ليس هناك من ذكر لخصائص الموجة في وصف هذا الانتقال. ونبين في الشكل التالي آليات انتقال الطاقة (تحول الطاقة من شكل لآخر).



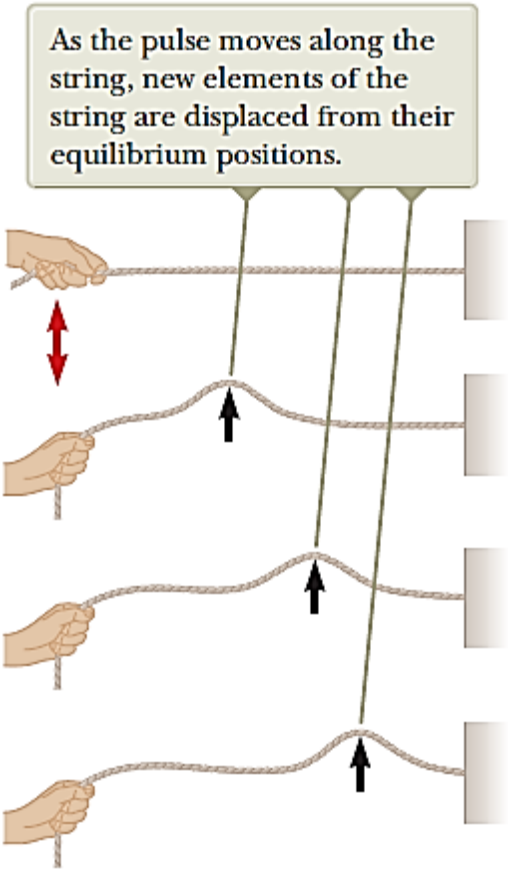
آليات انتقال الطاقة (تحول الطاقة من شكل لآخر).

بما يتعلق بتوليد الأمواج الميكانيكية فيتطلب ما يلي:

- منبع لإصدار أو توليد الأمواج،
- وسط يحتوي عناصر باستطاعتها نقل الأمواج،
- آلية فيزيائية بحيث كل عنصر من عناصر الوسط يؤثر في الآخر.

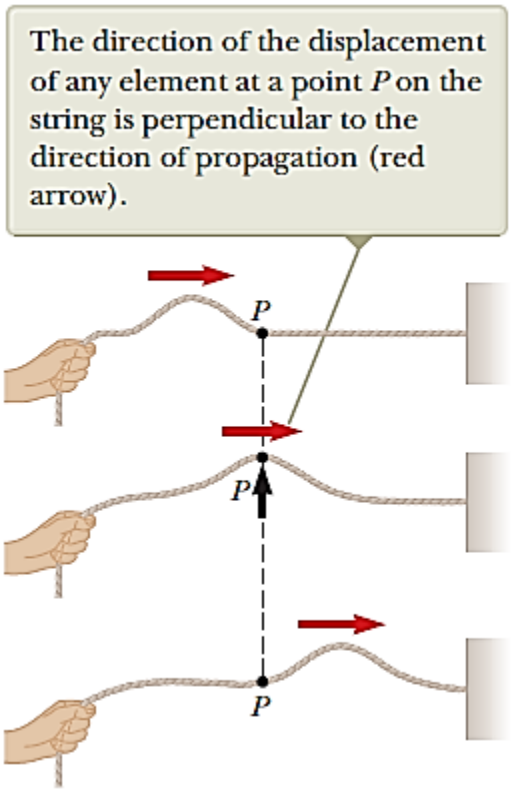
مثال:

تحريك نهاية حبل مثبت من أحد طرفيه بوساطة اليد نحو الأعلى والأسفل (وفق السهم)، مسبباً نبضة تنتقل على طول الحبل.



تحريك نهاية حبل مثبت من أحد طرفيه بوساطة اليد نحو الأعلى والأسفل (وفق السهم)، مسبباً نبضة تنتقل على طول الحبل.

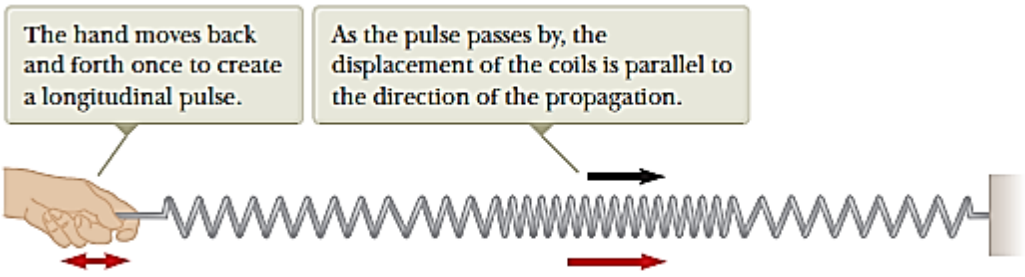
لنتبع حركة نبضة تنتقل على طول الحبل حيث كل عنصر من الحبل يتحرك في اتجاه عمودي على اتجاه الانتشار. يوضح الشكل التالي تحرك النقطة P من الحبل.



انتقال عنصر صغير من الحبل من أجل نبضة عرضية تنتقل على حبل مثبت من أحد طرفيه.

إن الموجة (أو النبضة) التي تؤدي لحركة عنصر من الوسط (الحبل) بشكل عمودي على اتجاه الحركة تُدعى بـ **"الموجة العرضية" "Transverse Wave"**.

يوضح الشكل التالي نموذج آخر من الأمواج (النبضات). إن الموجة (النبضة) التي تؤدي لحركة عنصر من الوسط (الحبل) بشكل موازي لاتجاه الحركة تُدعى بـ **"الموجة الطولية" "Longitudinal Wave"**.

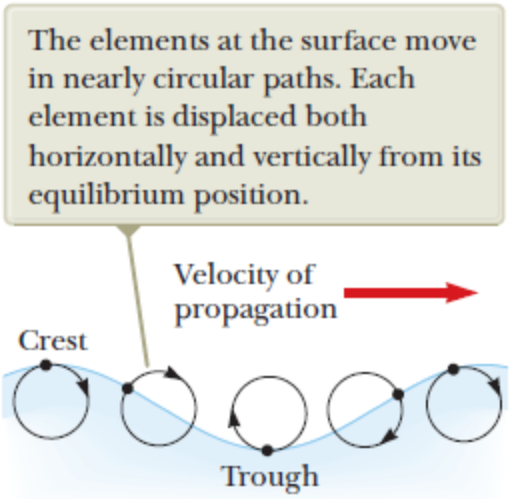


A longitudinal pulse along a stretched spring.

نبضة طولية على طول نابض.

إن الأمواج الصوتية، التي سنتحدث عنها لاحقاً، هي نموذج آخر للأمواج الطولية. إن انتقال الموجة الصوتية هو عبارة عن سلسلة من الضغط العالي والضغط المنخفض للمناطق التي تجتازها في الهواء.

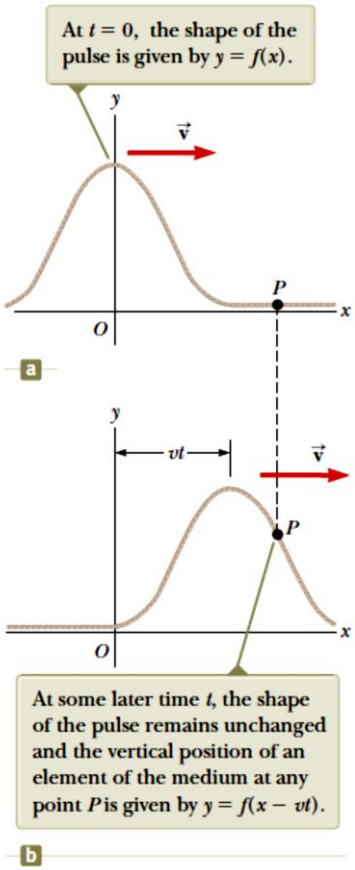
يوجد في الطبيعة بعض الأمواج التي تُعتبر مزيج من الأمواج الطولية والعرضية. إن الأمواج على سطح الماء هي مثال على ذلك، انظر الشكل المرفق.



حركة عناصر الماء على السطح في عمق الماء حيث تنتشر موجة تُعتبر تراكب (مزيج) من انتقال لموجة عرضية وطولية

هناك أمواج تنتشر وفق ثلاثة أبعاد تحت سطح الأرض، وهي عبارة عن مزيج من الأمواج الطولية والعرضية. في هذه الأمواج، إن الأمواج الطولية تكون أسرع من الأمواج العرضية. يُقدر سرعة الأمواج الطولية بالقرب من سطح الأرض بـــــــ $(7\ To\ 8\ km/s)$، بينما سرعة الأمواج العرضية فيُقدر بـــــــ $(4\ To\ 5\ km/s)$. ويُطلق على الأمواج الطولية بالأمواج P "P waves" نسبة إلى Primary، بينما يُطلق على الأمواج العرضية بالأمواج S "P waves" نسبة إلى Secondary، وهذه الأمواج هي المسؤولة عن الزلازل التي تحدث على سطح الكرة الأرضية.

بعد هذا الوصف الفيزيائي لحركة الموجة لننتقل إلى الوصف الرياضي. لنعتبر نبضة تنتقل (تتحرك) إلى اليمين على طول حبل كما هو موضح بالشكل المرفق.



نبضة تنتقل بسرعة وفق بعد واحد

إلى اليمين على حبل

إن التابع الرياضي الذي يصف النبضة في اللحظة صفر، وفق الشكل (a) هو:

$$t = 0 \rightarrow y(x,0) = f(x)$$

وبشكل عام:

$$y\,(x,t) = f(x - vt)$$

وبشكل مشابه، إذا انتقل النبضة إلى اليسار:

$$y(x,t) = f(x + vt)$$

ويُطلق على التابع y بتابع الموجة $Wave\ Function$، وهو يتعلق بمتحولين x و t. ولهذا السبب يُكتب غالباً بالشكل $y(x,t)$ والذي يُقرأ " تباع لـ x و t. إنه من المهم معرفة قياس أو حساب y.

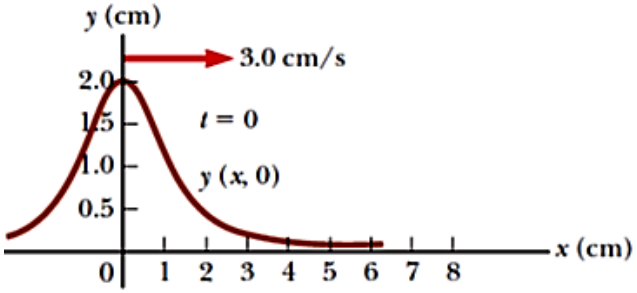
مثال: نبضة تتحرك إلى اليمين:

لنفرض أنه لدينا نبضة تتحرك نحو اليمين على طول المحور x وفق التابع الآتي:

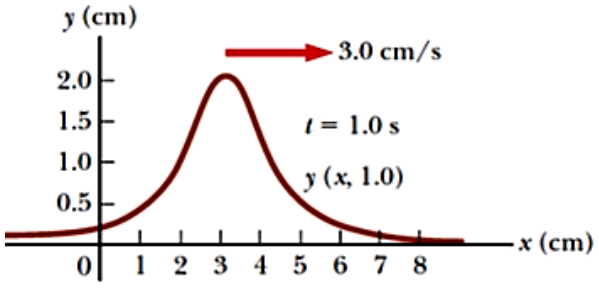
$$y\,(x,t) = \frac{2}{(x - 3{,}0\,t)^2 + 1}$$

حيث المسافة x تُقاس بالسنتيمتر cm والزمن بالثانية s. المطلوب إيجاد قيم التابع $y\,(x,t)$ من أجل: $(t = 0s, t = 1{,}0s\ \&\ t = 2{,}0s)$.

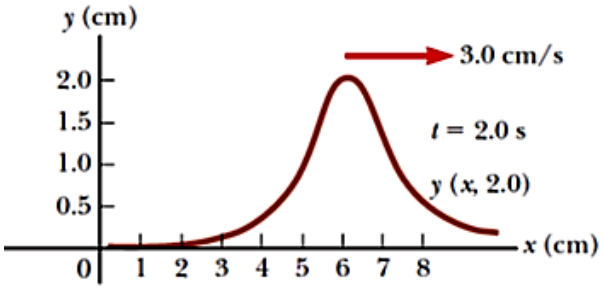
الحل:



$$t = 0s \rightarrow$$
$$y\,(x, 0) = \frac{2}{x^2 + 1}$$

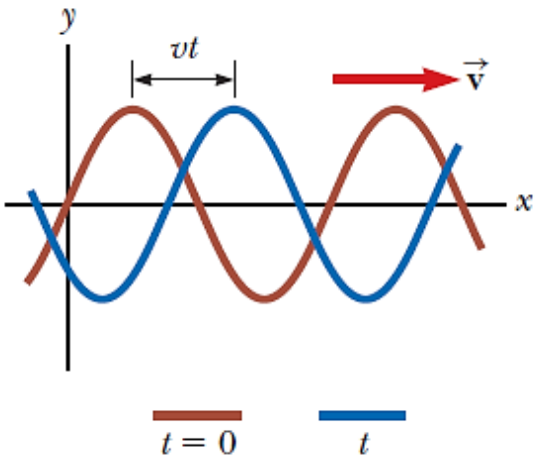


$$t = 1,0s \rightarrow$$
$$y\,(x, 1, 0) = \frac{2}{(x - 3,0)^2 + 1}$$



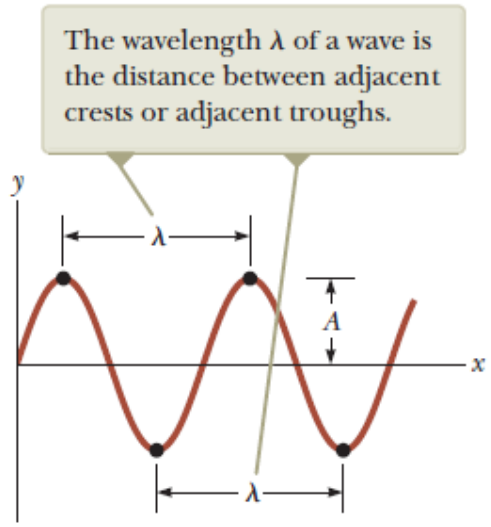
$$t = 2,0\ s \rightarrow$$
$$y\,(x, 2, 0) = \frac{2}{(x - 6,0)^2 + 1}$$

3- نموذج (موديل) تحليلي لوصف انتقال الموجة

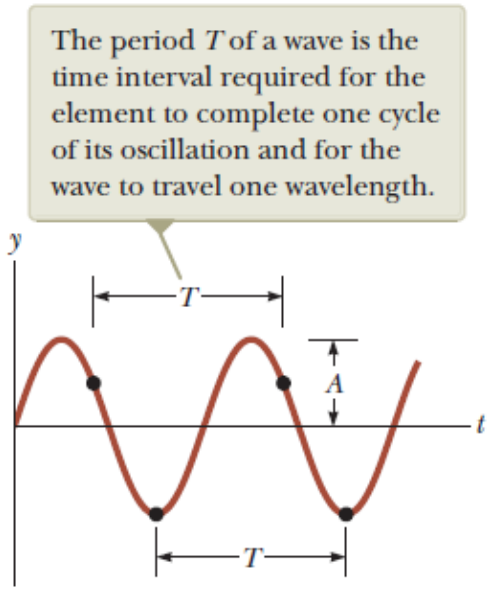


يوضح الشكل التالي انتقال موجة جيبيه في بعد واحد إلى اليمين بسرعة v . يمثل المنحني البني صورة سريعة لموجة في اللحظة $t = 0$، والمنحني الأزرق يمثل صورة سريعة لموجة جيبية في لحظة سابقة t.

والشكل التالي يبين مفهوم طول الموجة λ ودورها T.



طول الموجة
$Wavelength\ \lambda$



الدور
$Period\ T$

(a) صورة سريعة لموجة جيبيه، (b) وضع عنصر من الوسط بتابعية الزمن t.

إن العلاقة بين التردد $frequency - f$ والدور $period - T$ هي:

$$f = \frac{1}{T}\left[\frac{1}{s}\right] = \frac{1}{T}[Hertz]$$

أي أن واحدة التردد هي الهرتز $Hertz$ الذي هو مقلوب الزمن $1/s = s^{-1}$.

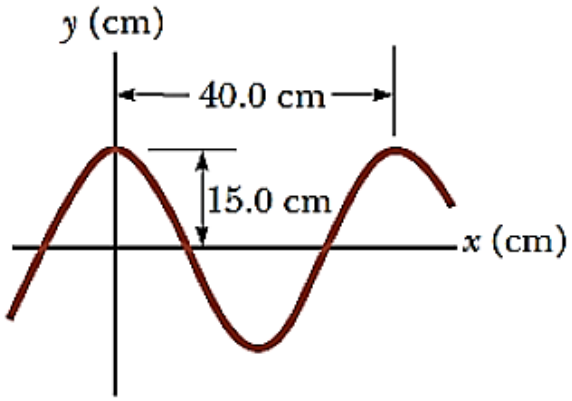
إن لكل موجة سرعة خاصة بها. تتعلق السرعة بخصائص الوسط الذي تنتشر به الموجة. على سبيل المثال، الأمواج الصوتية تسير بغرفة درجة حرارتها تساوي درجة حرارة الهواء الطبيعي بسرعة تُقدر بـ:

سرعة الموجة في الهواء الطبيعي ←	$343\frac{m}{s} = 781\frac{mi}{h}$
العدد الموجي الزاوي ←	$Angular\ Wave\ Number\ \ k = \frac{2\pi}{\lambda}$
التردد (التواتر) الزاوي ←	$Angular\ Frequency\ \ \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$
التابع الموجي لموجة جيبيه ←	$Wave\ Function\ for\ a\ Sinusoidal\ Wave$ $y = A\sin(kx - \omega t)$
سرعة تابع موجي جيبي ←	$Speed\ of\ a\ Sinusoidal\ Wave$ $v = \frac{\omega}{k} = \lambda f$

مثال: انتقال موجة جيبيه – A Traveling Sinusoidal Wave

تسير موجة جيبيه بالاتجاه الموجب للمحور x، سعتها $(15\ cm)$ طولها $(40\ cm)$، وترددها $(8\ Hz)$، الموضع العمودي لعنصر من الوسط في اللحظة $(t = 0)$ وعند $(x = 0)$ يساوي أيضاً كما هو موضح في الشكل المرفق. المطلوب إيجاد كل من:

1) العدد الموجي k، الدور T، التردد الزاوي ω، وسرعة الموجة v.
2) حدد ثابت الطور ϕ واكتب العلاقة العامة لتابع الموجة.



موجة جيبية طولها
$\lambda = 40,0\ cm$
وسعتها تساوي
$A = 15,0\ cm$

الحـــل:

(1) العدد الموجي k، الدور T، التردد الزاوي ω، وسرعة الموجة v:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{40.0 \text{ cm}} = 15.7 \text{ rad/m}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8.00 \text{ s}^{-1}} = 0.125 \text{ s}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(8.00 \text{ s}^{-1}) = 50.3 \text{ rad/s}$$

$$v = \lambda f = (40.0 \text{ cm})(8.00 \text{ s}^{-1}) = 3.20 \text{ m/s}$$

(2) حدد ثابت الطور ϕ واكتب العلاقة العامة لتابع الموجة:

$$A = 15.0 \text{ cm}, y = 15.0 \text{ cm}, x = 0, \text{ and } t = 0$$

$$15.0 = (15.0)\sin\phi \rightarrow \sin\phi = 1 \rightarrow \phi = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

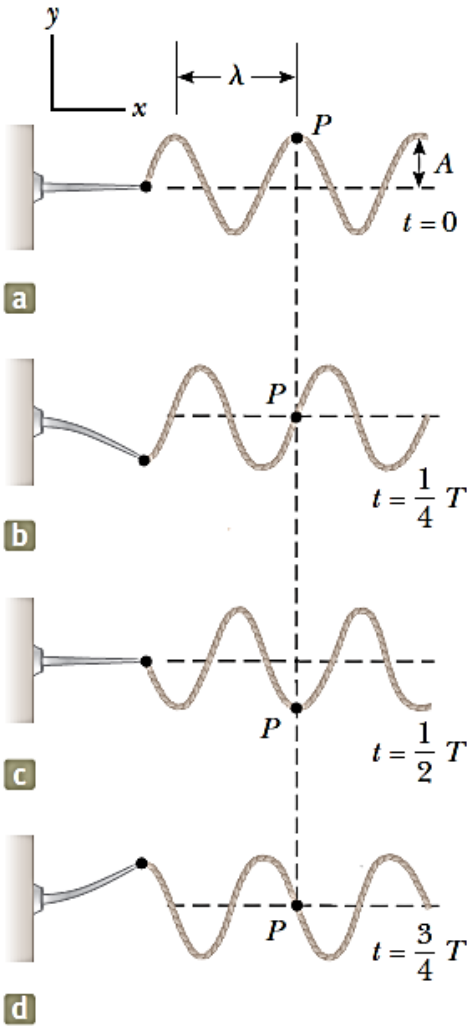
التابع الموجي:

$$y = A\sin\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$y = 0.150\cos(15.7x - 50.3t)$$

MANARA UNIVERSITY

أمواج جيبيه في حبال – Sinusoidal Waves on Strings



إحدى الطرق لتوليد موجة جيبيه في حبل. النهاية اليسرى للحبل موصولة بشفرة تهتز. كل عنصر من الحبل، كالنقطة P مثلاً، تهتزوفق حركة تو افقية بسيطة بالاتجاه العمودي للانتشار.

التابع الموجي:

$$y = A\sin(kx - \omega t)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt}\Big]_{x=constant} = \frac{\partial y}{dt} = -\omega A\cos(kx - \omega t)$$

$$\rightarrow v_{ymax} = \omega A$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt}\Big]_{x=constant} = \frac{\partial v_y}{dt} = -\omega^2 A\sin(kx - \omega t)$$

$$\rightarrow a_{ymax} = \omega^2 A$$

هناك نوعان من السرعة:

يجب أن نميز بين السرعة v، سرعة الموجة التي تنتشر على طول الحبل، والسرعة v_y، السرعة العرضية لنقطة من الحبل. إن السرعة v ثابتة من أجل وسط متجانس، بينما تتغير بشكل جيبي.

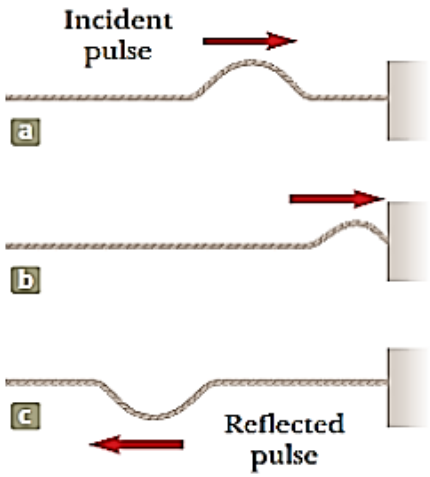
4- سرعة الأمواج على الحبال: The Speed of Wave on Strings

تشير الدراسة النوعية لسرعة نبضة على حبل إلى:

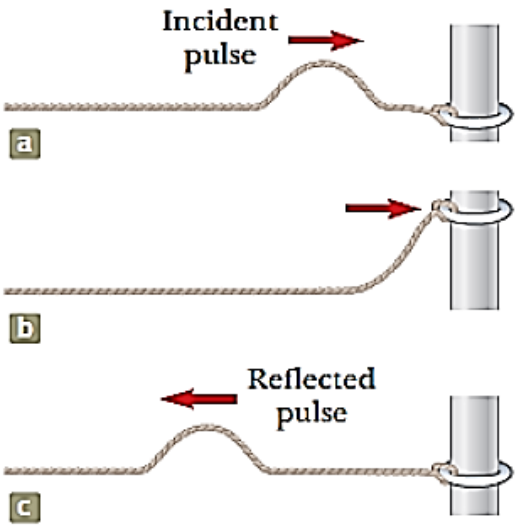
- تأثير الكثافة الخطية الكتلية (التي تساوي قسمة الكتلة التي تُقدر بالكيلو غرام على الطول) في السرعة (إذا ازدادت الكثافة تناقصت السرعة).
- تأثير قوة التوتر T التي تُقدر بالنيوتن N في السرعة (إذا ازداد التوتر ازدادت السرعة).
- بحسب قانون نيوتن الثاني، فإن تسارع عنصر من الحبل يزداد بازدياد التوتر. إذا عاد العنصر إلى وضع التوازن بشكل سريع فهذا بسبب تزايد تسارعه، وهذا يقودنا إلى القول بإن السرعة تكون أكبر. إذاً، نتوقع أن سرعة الموجة تزداد بزيادة التوتر.
- بشكل مشابه، بسبب صعوبة تسريع عنصر من حبل كتلته كبيرة مقارنة بعنصر من حبل أخف، فإن السرعة يجب أن تتناقص مع تزايد الكتلة بوحدة الطول من الحبل. إذا كان التوتر T وكتلة واحدة الطول للحبل μ (حيث μ حرف يوناني)، فوجد أن سرعة الموجة تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

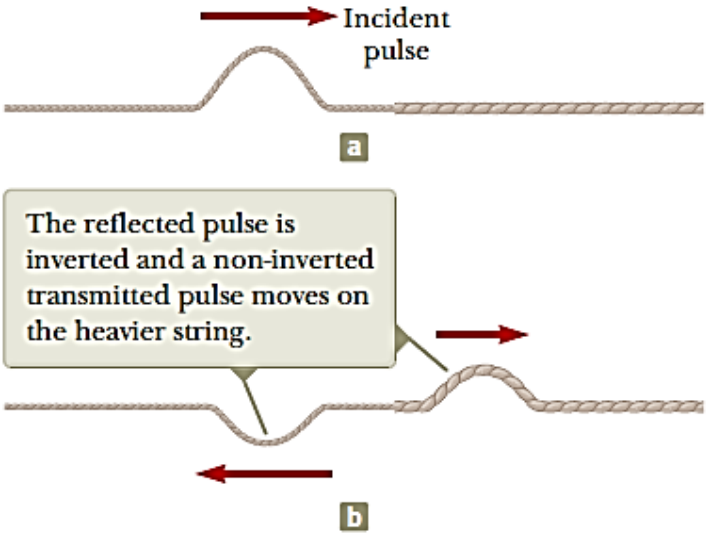
5- الانعكاس والنفوذية: Reflection and Transmission



انعكاس نبضة تنتقل في حبل ثابت في نهايته.
إن النبضة المنعكسة تنقلب (تنعكس)،
لكن شكلها لا يتغير.

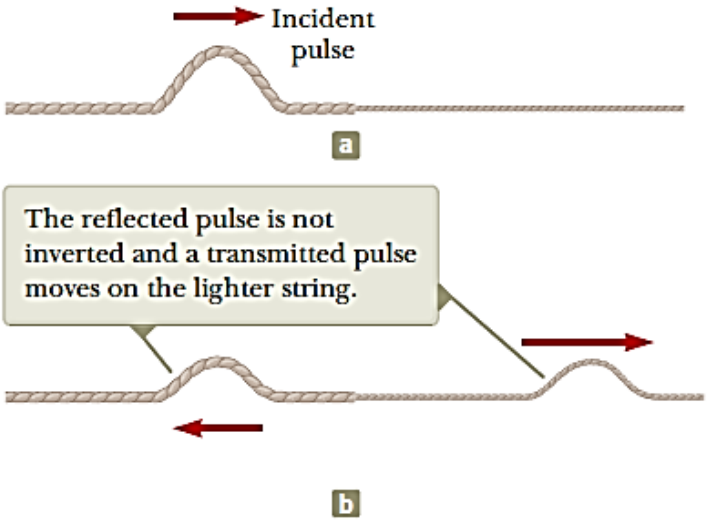


انعكاس نبضة تنتقل في حبل حر في نهايته.
إن النبضة المنعكسة لا تنعكس (تنقلب)،
لكن شكلها لا يتغير.



(a) نبضة تنتقل نحو اليمين على حبل موصول بحبل آخر أثقل.

(b) النبضة تنعكس (تنقلب)، وليس هناك من نبضة تتحرك في الحبل الثقيل، لكن شكلها لا يتغير.



(a) نبضة تنتقل نحو اليمين على حبل موصول بحبل آخر أخف.

(b) النبضة لا تنعكس (لا تنقلب)، وهناك نبضة تتحرك في الحبل الخفيف، لكن شكلها لا يتغير.