Mechanical wave

N. Srimanobhas
Norraphat.Srimanobhas@mail.cern.ch

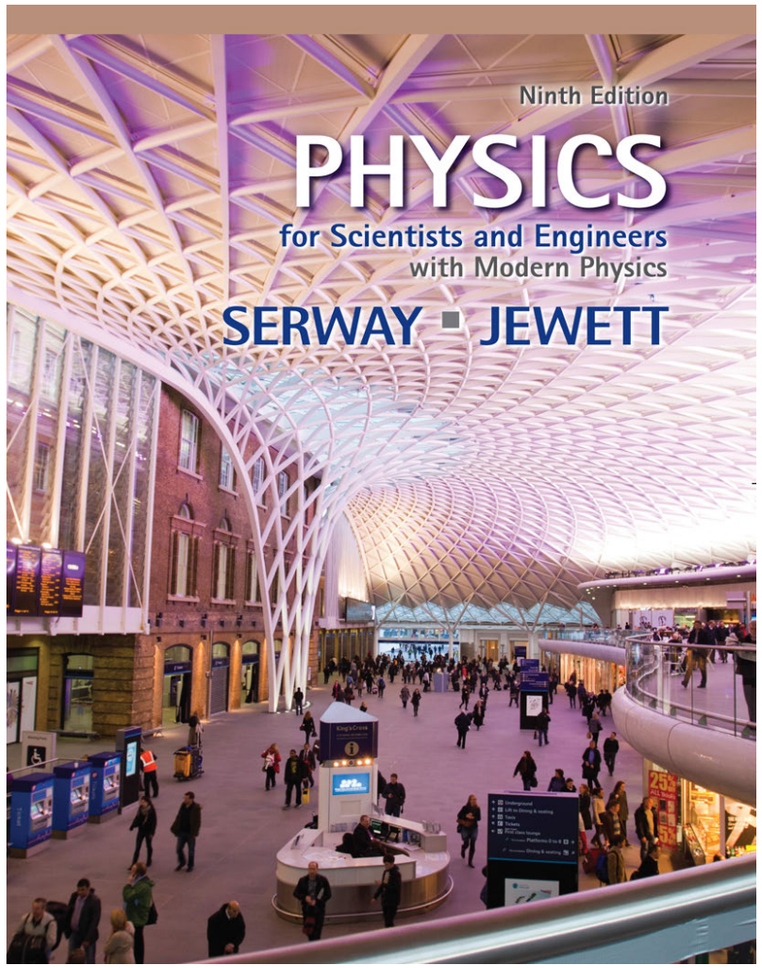
https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Main/PhatSrimanobhasTeachingCU

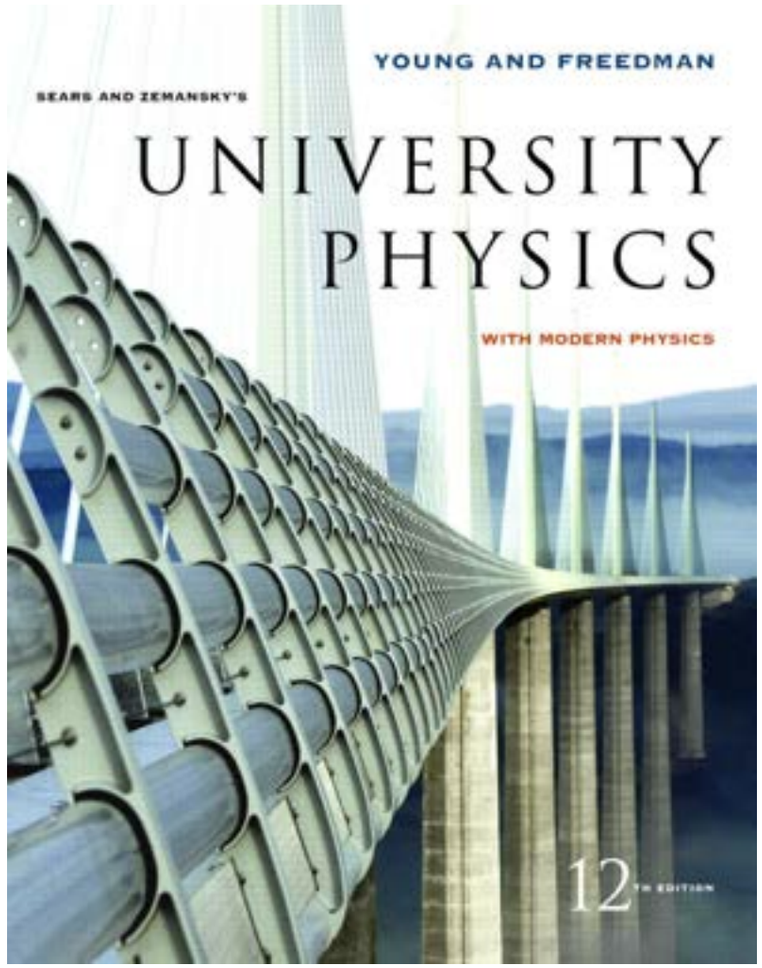
Contents

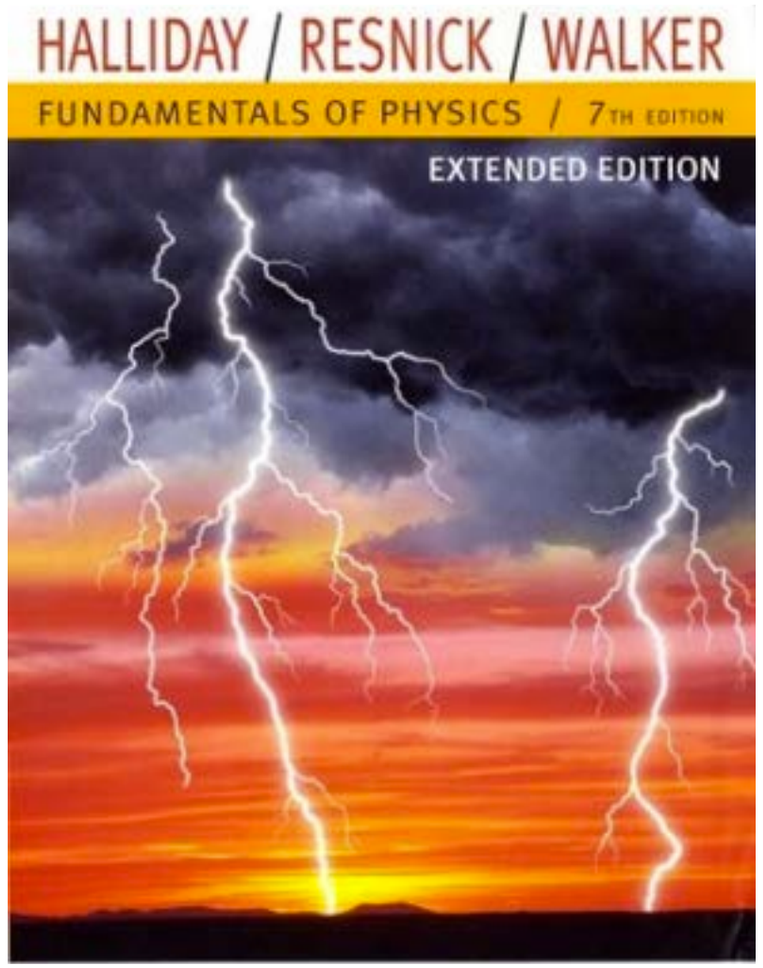
- **Mechanical wave**
  - Propagation of a disturbance & Types of mechanical waves
  - Wave function & Superposition of waves & Wave equation
  - Sinusoidal wave
  - Superposition of waves
  - Standing wave
  - Beat: Interference in time
  - Rate of energy transfer by sinusoidal wave on string
  - Sound wave
    - ➡ Speed of sound wave
    - ➡ Intensity of periodic sound wave
    - ➡ Standing waves in air columns
    - ➡ Doppler effect

นิสิตควรหัดทำแบบฝึกหัดท้ายบทของหนังสืออ้างอิง

References


Ninth Edition
PHYSICS
for Scientists and Engineers
with Modern Physics
SERWAY ■ JEWETT


YOUNG AND FREEDMAN
SEARS AND ZEMANSKY'S
UNIVERSITY
PHYSICS
WITH MODERN PHYSICS
12TH EDITION

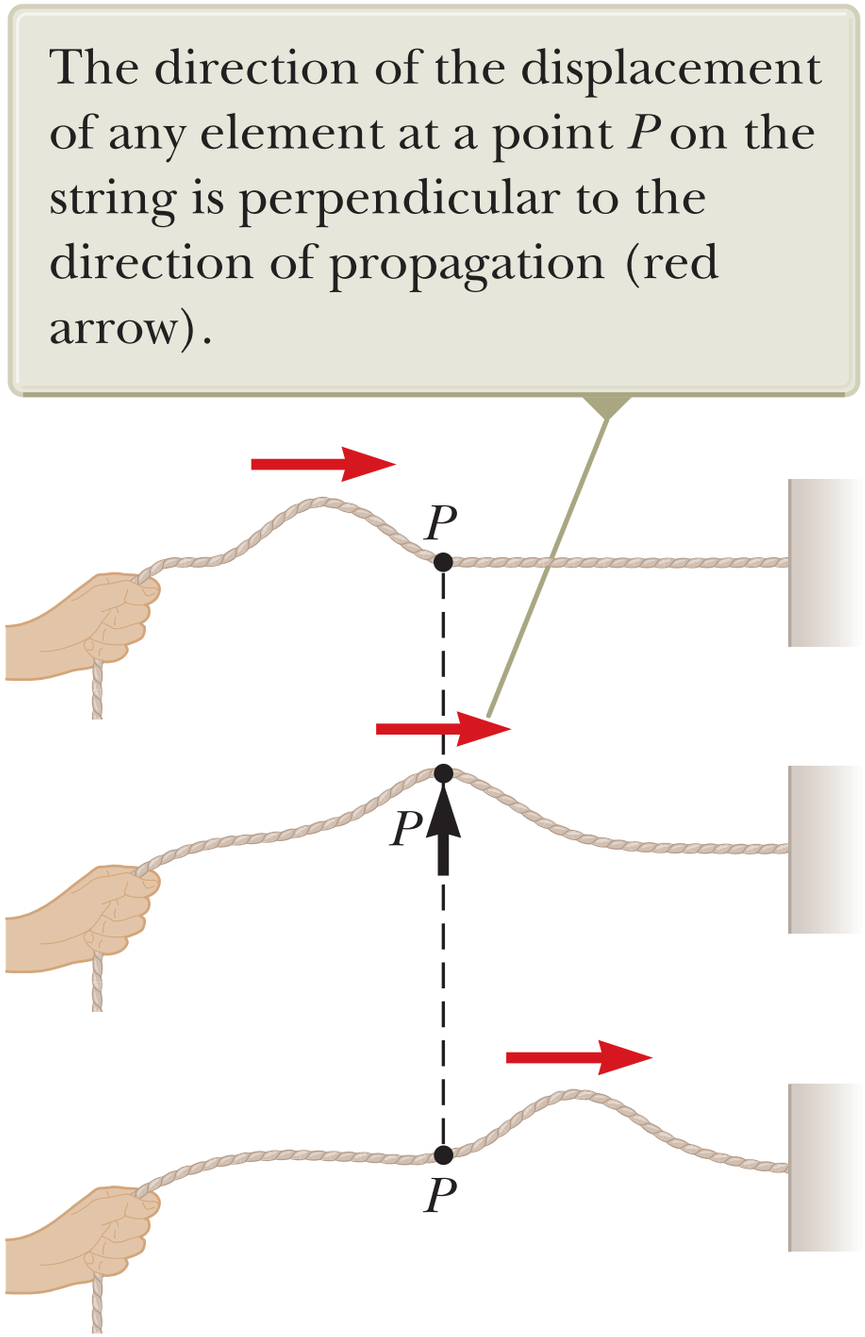

HALLIDAY / RESNICK / WALKER
FUNDAMENTALS OF PHYSICS / 7TH EDITION
EXTENDED EDITION

คลื่นกล (Mechanical wave)

คลื่นที่เคลื่อนที่ไปโดยการสั่นของตัวกลาง มีการส่งผ่านพลังงานไปในตัวกลาง

- ต้องมีการรบกวนระบบ (ใส่พลังงานเข้าไป ในระบบ)
- ต้องอาศัยตัวกลาง แต่ตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ จะสั่นไปมารอบจุดสมดุล
- การเคลื่อนที่ของคลื่นจะส่งผ่านพลังงานจากบริเวณหนึ่ง ๆ ของตัวกลางไปสู่บริเวณอื่น ๆ

คลื่นตามขวาง (Transverse wave)



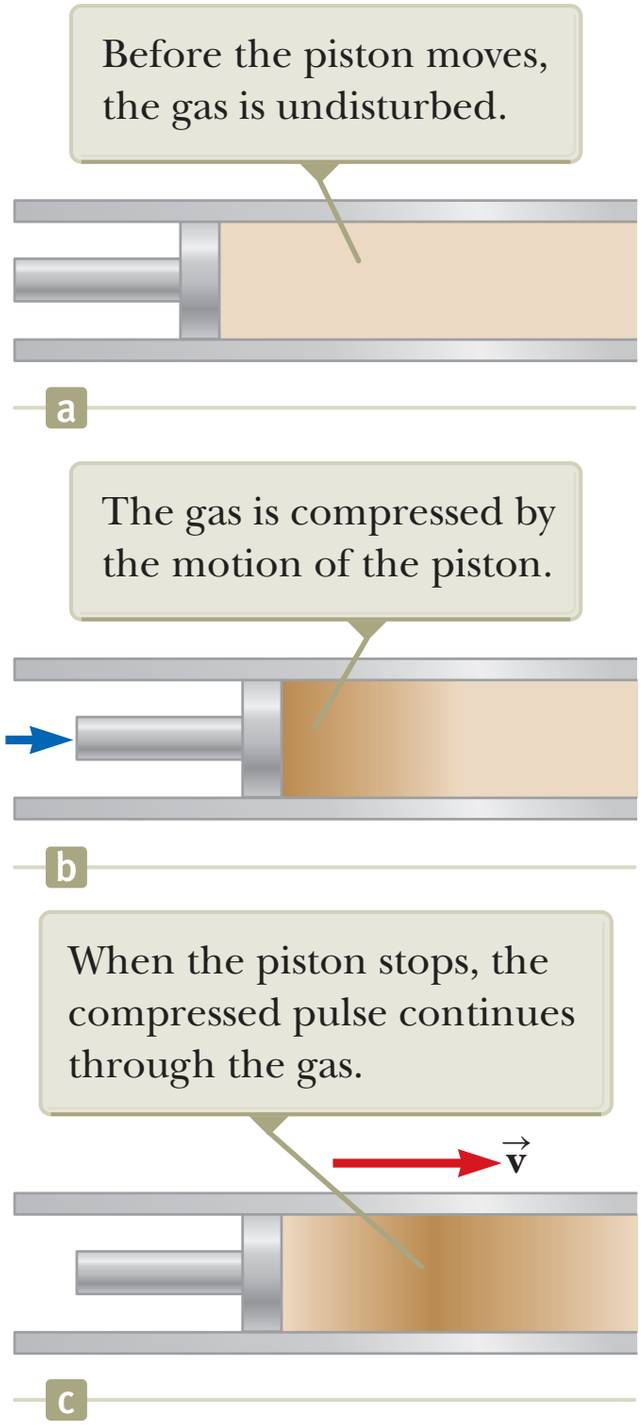
อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของเคลื่อน ตัวอย่างเช่น

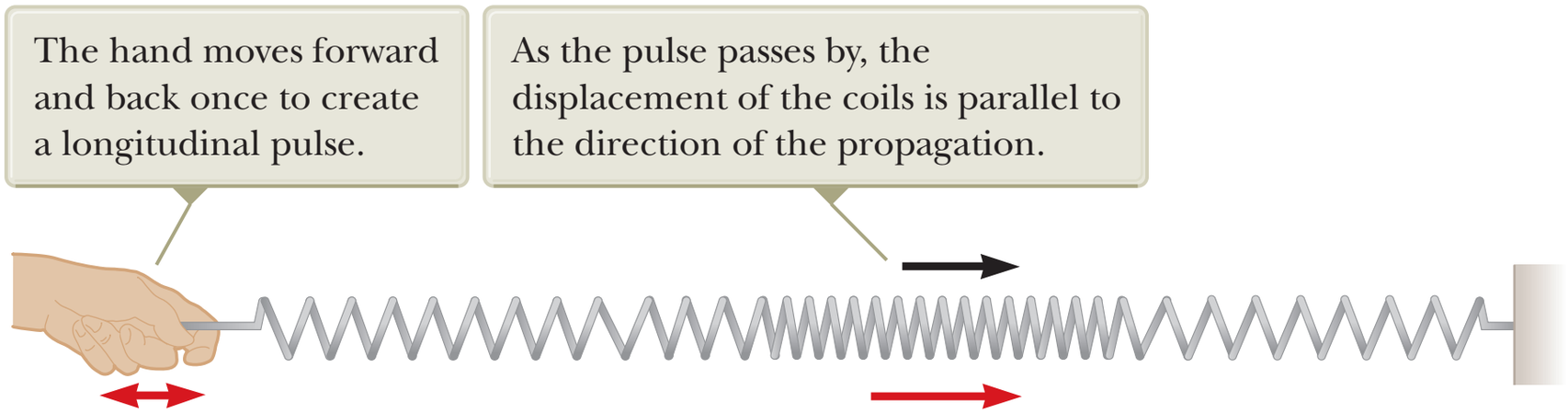
- คลื่น ในเส้นเชือก

คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)

อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของเคลื่อน ตัวอย่างเช่น

- คลื่นเสียง
- คลื่น ในสปริง



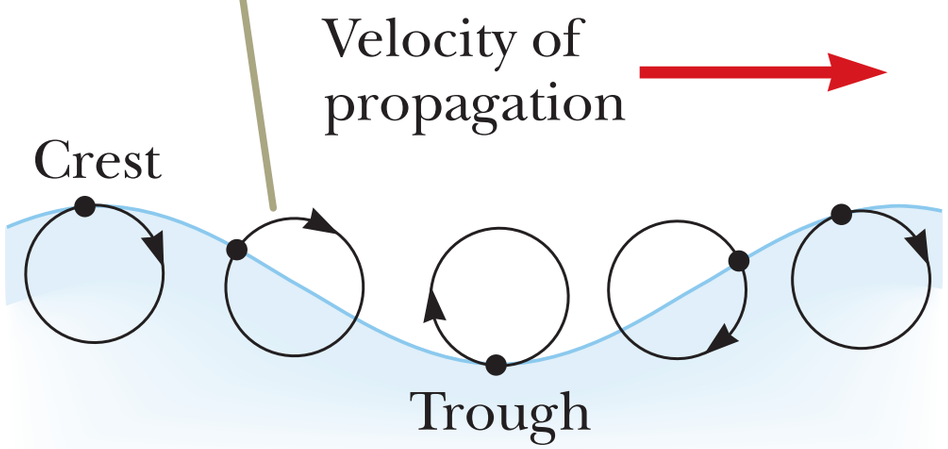


คลื่นที่ผิว (Surface waves)

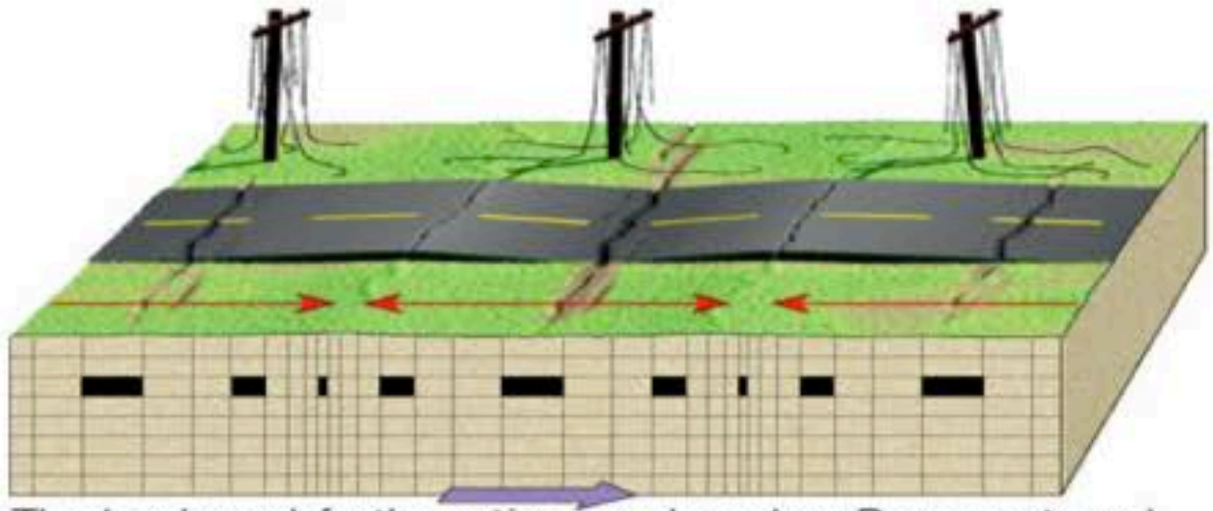
อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ทั้ง 2 แนว

- คลื่นผิวน้ำ
- คลื่นแผ่นดินไหว

The elements at the surface move in nearly circular paths. Each element is displaced both horizontally and vertically from its equilibrium position.

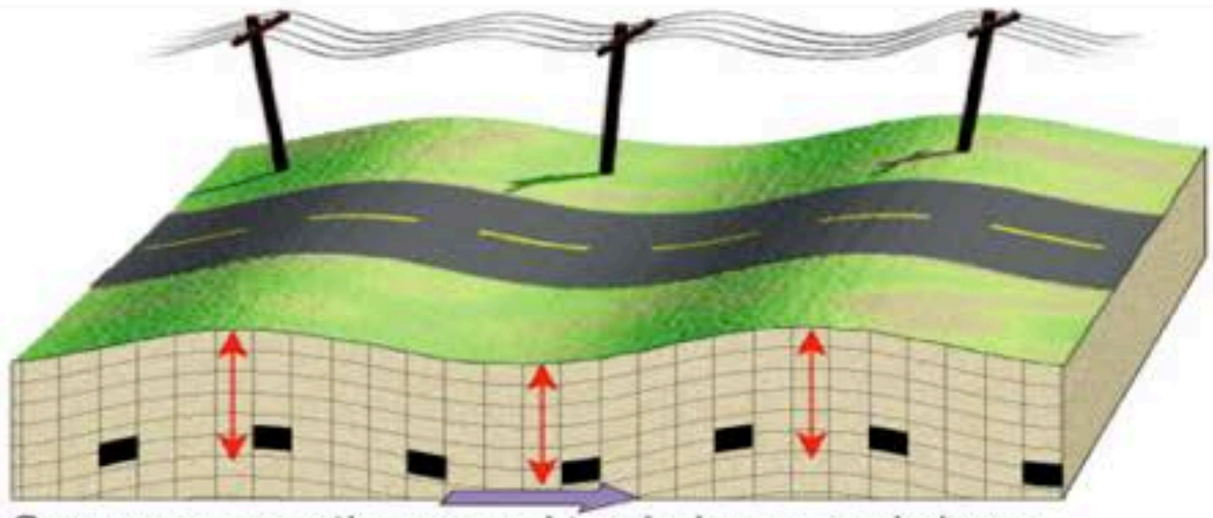


Primary waves



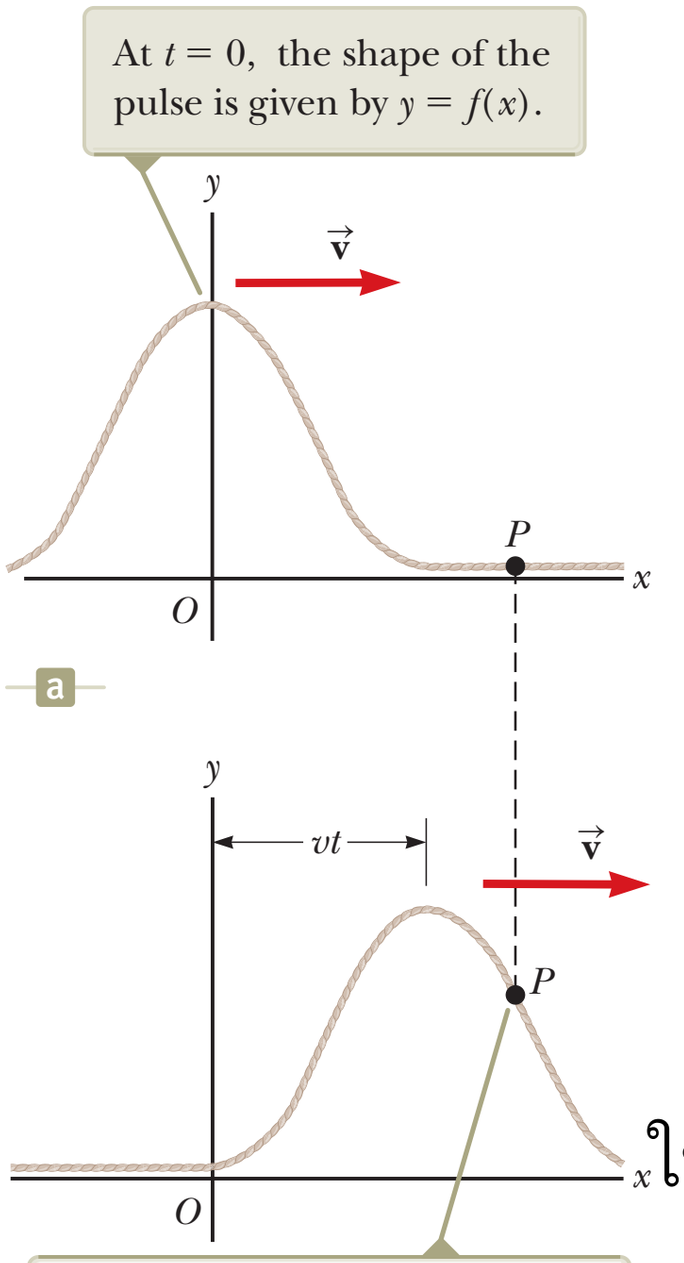
The back-and-forth motion produced as P waves travel along the surface can cause the ground to buckle and fracture.

Secondary waves



S waves cause the ground to shake up-and-down and sideways.

ฟังก์ชั่นคลื่น (Wave function)



พิจารณาความสูงของคลื่นที่เวลา t_1 และ t_2

$$y(x_1, t_1) = f(x_1 \pm vt_1)$$

$$y(x_2, t_2) = f(x_2 \pm vt_2)$$

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไป รูปทรงของคลื่นยังเหมือนเดิม

$$y(x_1, t_1) = y(x_2, t_2)$$

หรือ

$$x_1 \pm vt_1 = x_2 \pm vt_2$$

พิจารณา ให้เวลาตอนเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$$t_1 = 0$$

$$x_1 = x_2 \pm vt_2$$

ให้มีค่าคงที่ (เริ่มต้น) — มองเข้าหาคลื่น

คงที่

$x_1 = x_2 - vt$ → t เพิ่ม x_2 ต้องเพิ่ม → คลื่นไปทางขวา

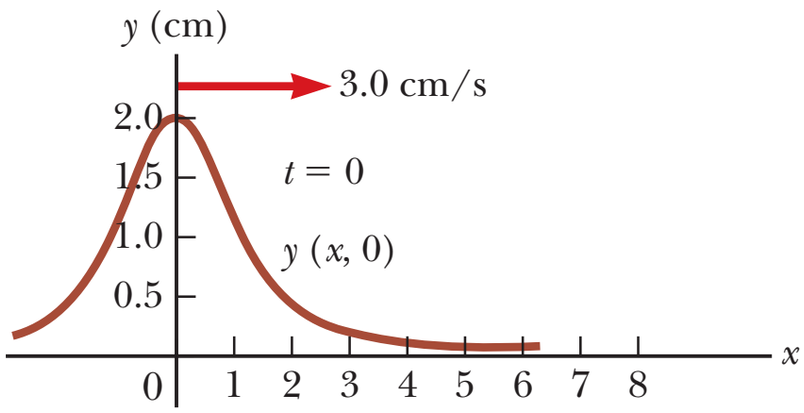
$x_1 = x_2 + vt$ → t เพิ่ม x_2 ต้องลด → คลื่นไปทางซ้าย

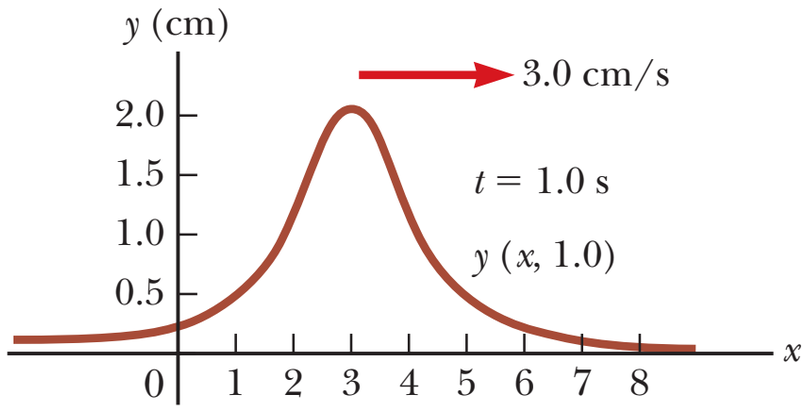
ตัวอย่าง

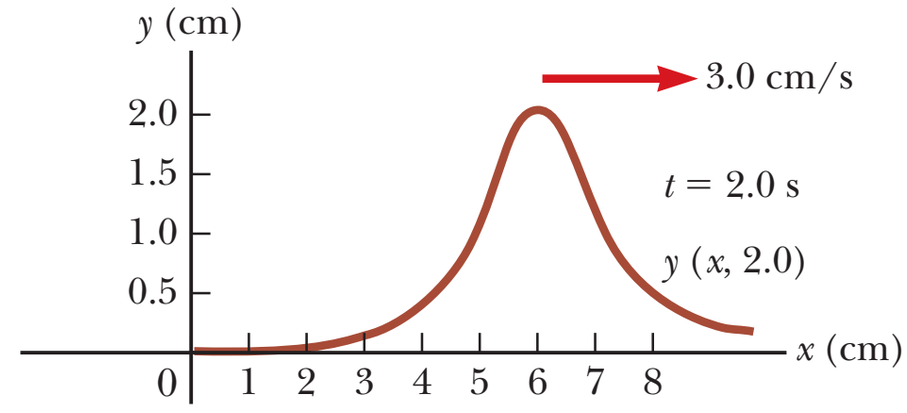
คลื่นลูกหนึ่งเคลื่อนที่ไปทางขวาตามแนวแกน x ด้วยฟังก์ชั่นคลื่น

$$y(x,t) = \frac{2}{(x - 3.0t)^2 + 1}$$

จงพิจารณาฟังก์ชั่นคลื่นที่เวลา t = 0,1 และ 2 วินาทีตามลำดับ โดย x และ y อยู่ในหน่วยเซนติเมตร

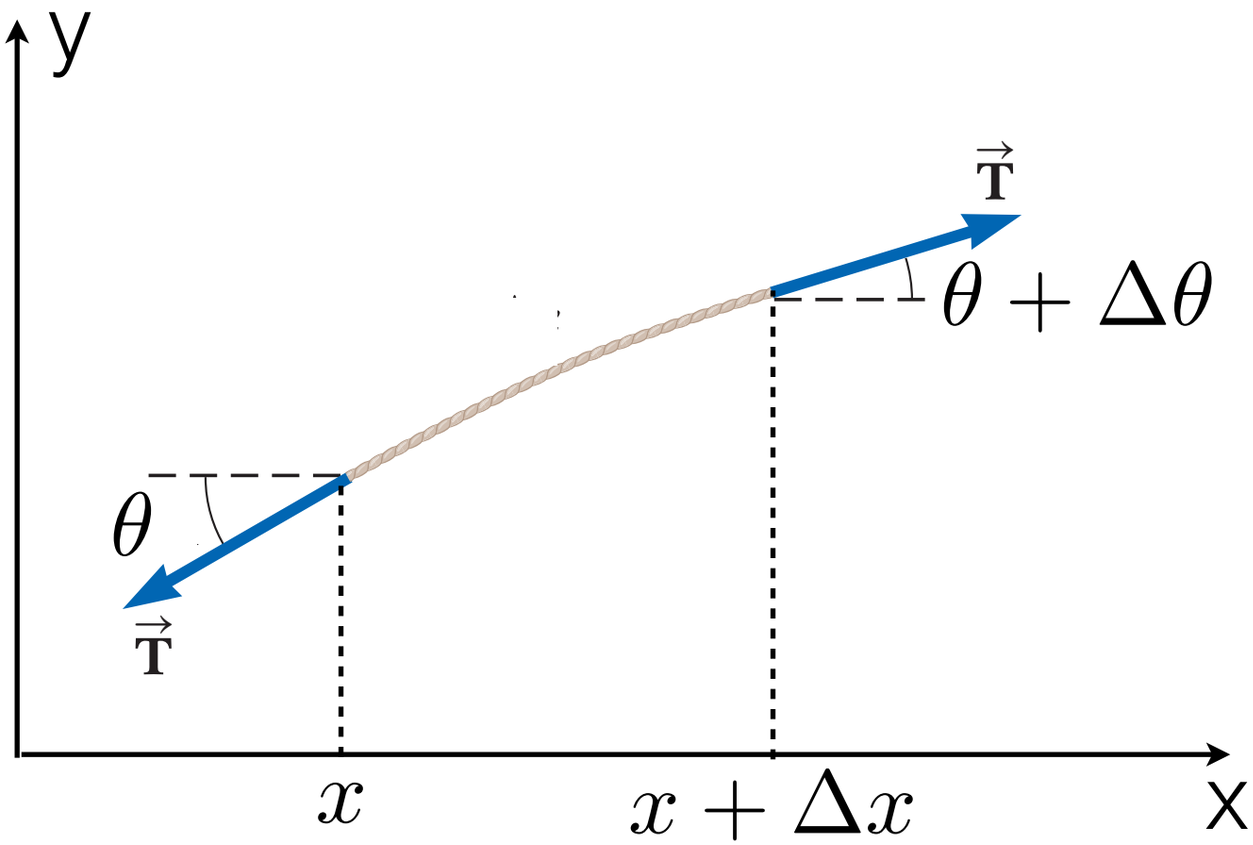






สมการคลื่น (Wave equation)

พิจารณาคลื่น ในเส้นเชือก



จากกฎข้อ 2 ของนิวตัน

$$(dm)\ddot{y} = T(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta)$$

$$\simeq T\Delta\theta$$

ให้ μ เป็นมวลต่อหน่วยความยาว

$$(dm) = \mu(\Delta x)$$

$$\mu(\Delta x)\ddot{y} = T\Delta\theta$$

หาค่า $\tan(\theta)$

$$\tan(\theta) = \frac{\partial y}{\partial x}$$

y ขึ้นอยู่กับ x และเวลา t จากรูปพิจารณา ณ เวลาหนึ่ง ๆ เท่านั้น

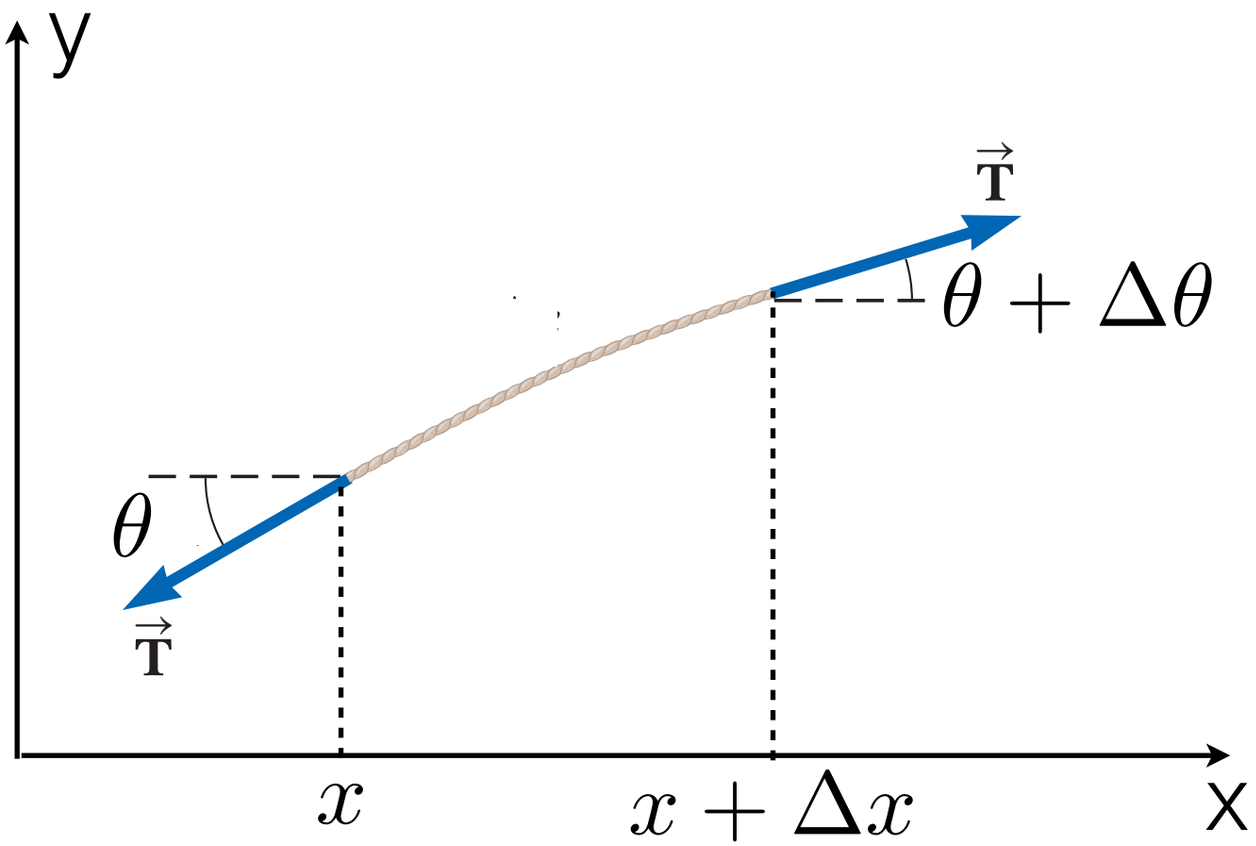
ทำ Derivative เทียบ x

พิจารณามุมเล็ก ๆ เทอมนี้ = 1

$$\frac{1}{\cos^2\theta}\frac{d\theta}{dx} = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x}$$

สมการคลื่น (Wave equation)

พิจารณาคลื่นในเส้นเชือก



แทนค่าไปในกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\mu(\Delta x)\frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = T\frac{\partial^2 y}{\partial^2 x}(\Delta x)$$

$$\frac{\mu}{T}\frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x}$$

y ควรอยู่ในรูปของ $f(x \pm Ct)$

C มีหน่วยเป็นความเร็ว [m/s]

เขียน C ด้วย $v = \sqrt{T/\mu}$

เราจะได้รูปทั่วไปของ**สมการคลื่น**

$$\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x}$$

ตัวอย่าง

จงแสดงว่าฟังก์ชั่นคลื่นต่อไปนี้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ของสมการคลื่น โดยที่ b เป็นค่าคงที่

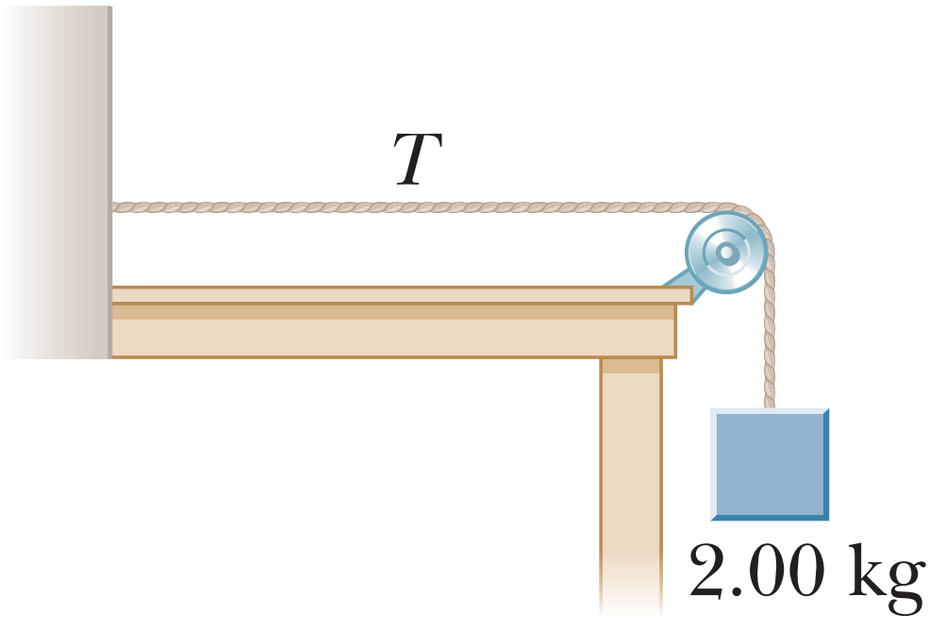
$$(\mathrm{a})\, y(x,t) = \ln[b(x - vt)]$$

$$(\mathrm{b})\, y(x,t) = e^{b(x-vt)}$$

$$(\mathrm{c})\, y(x,t) = x^2 + v^2 t^2$$

ตัวอย่าง

เชือกเส้นหนึ่งมีมวล 0.3 kg และยาว 6 m (ตามรูป) ยึดเชือกด้านหนึ่งไว้กับกำแพง อีกด้านหนึ่งคล้องผ่านรอกและผูกไว้กับมวล 2.0 kg จงหาความเร็วของคลื่นบนเชือกเส้นนี้

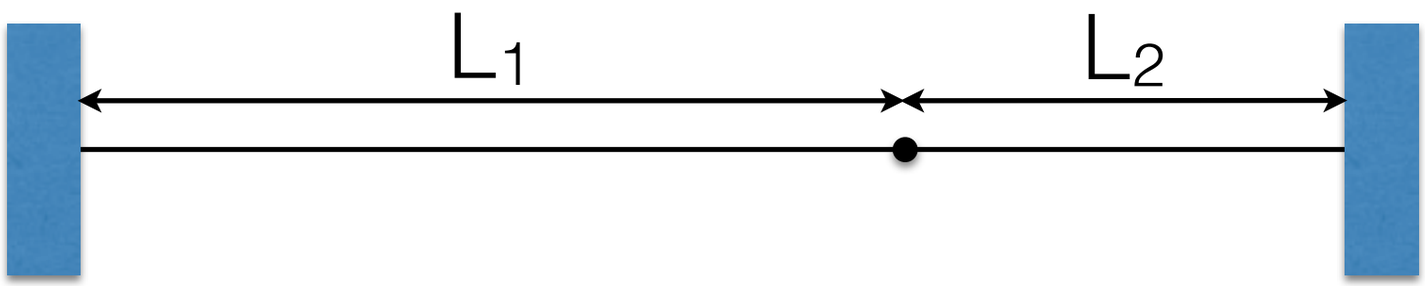


ตัวอย่าง

จากรูป เชือกสองเส้นผูกปมเชื่อมเข้าด้วยกัน แล้วผูกปลายที่เหลือเข้ากับจุดตรึง กำหนด ให้มวลต่อหน่วยความยาวของเชือกทั้งสองเส้นเป็น

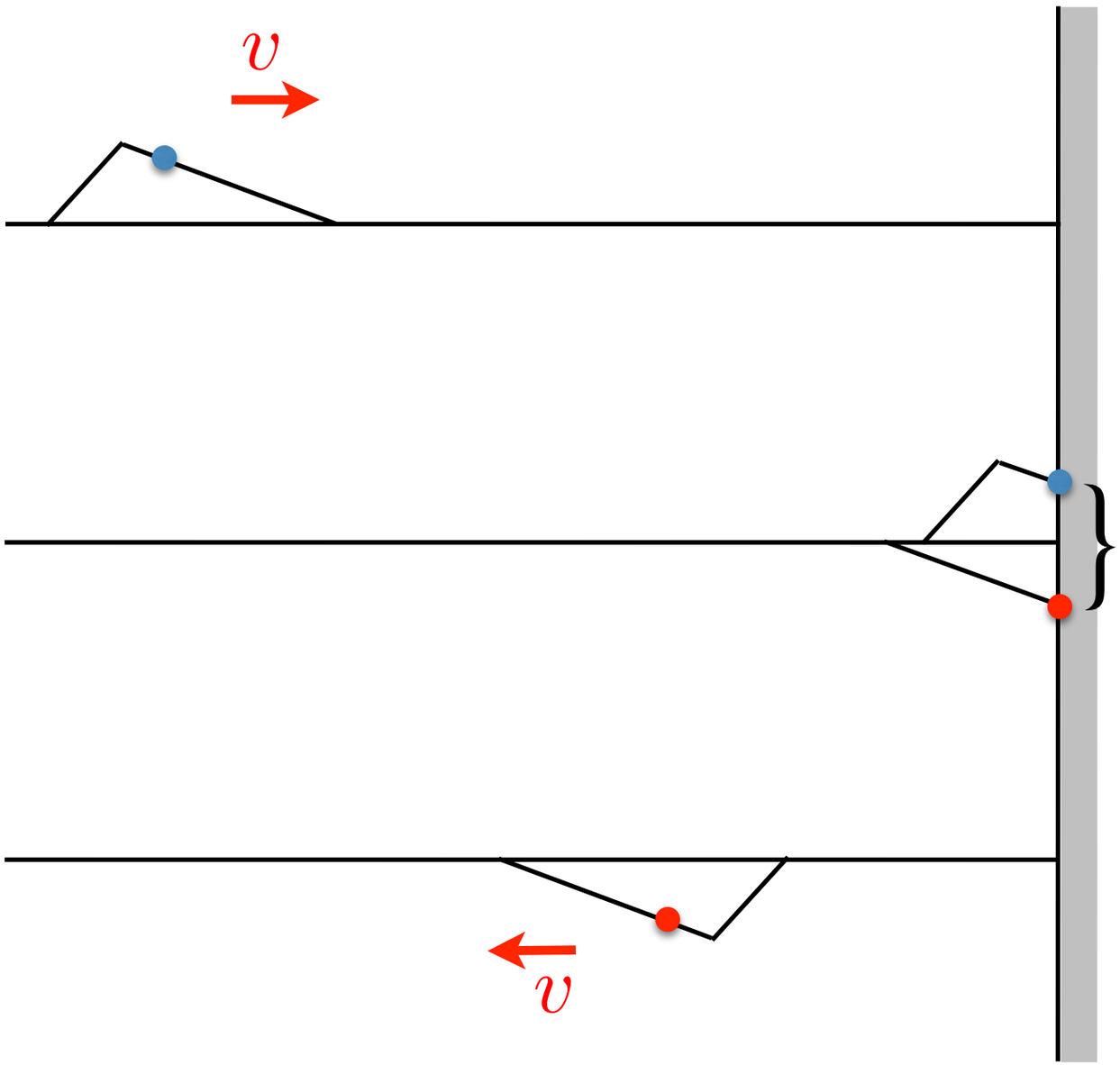
$$\mu_1 = 1.4 \times 10^{-4}\mathrm{Kg/m}, \mu_2 = 2.8 \times 10^{-4}\mathrm{Kg/m}$$

กำหนดความยาวของเชือกเส้นที่หนึ่งเป็น $L_1 = 3.0$ m และ ของเชือกเส้นที่สอง $L_2 = 2.0$ m และเชือกเส้นที่หนึ่งมีแรงตึงเท่ากับ 400 N ถ้ามีการส่งคลื่นดลจากจุดตรึงที่ปลายเชือกทั้งสองออกมากพร้อมกัน ให้มีทิศทางวิ่งเข้ามาหาปม คลื่นดลจากปลาย ใดจะถึงปมของเชือกก่อนกัน



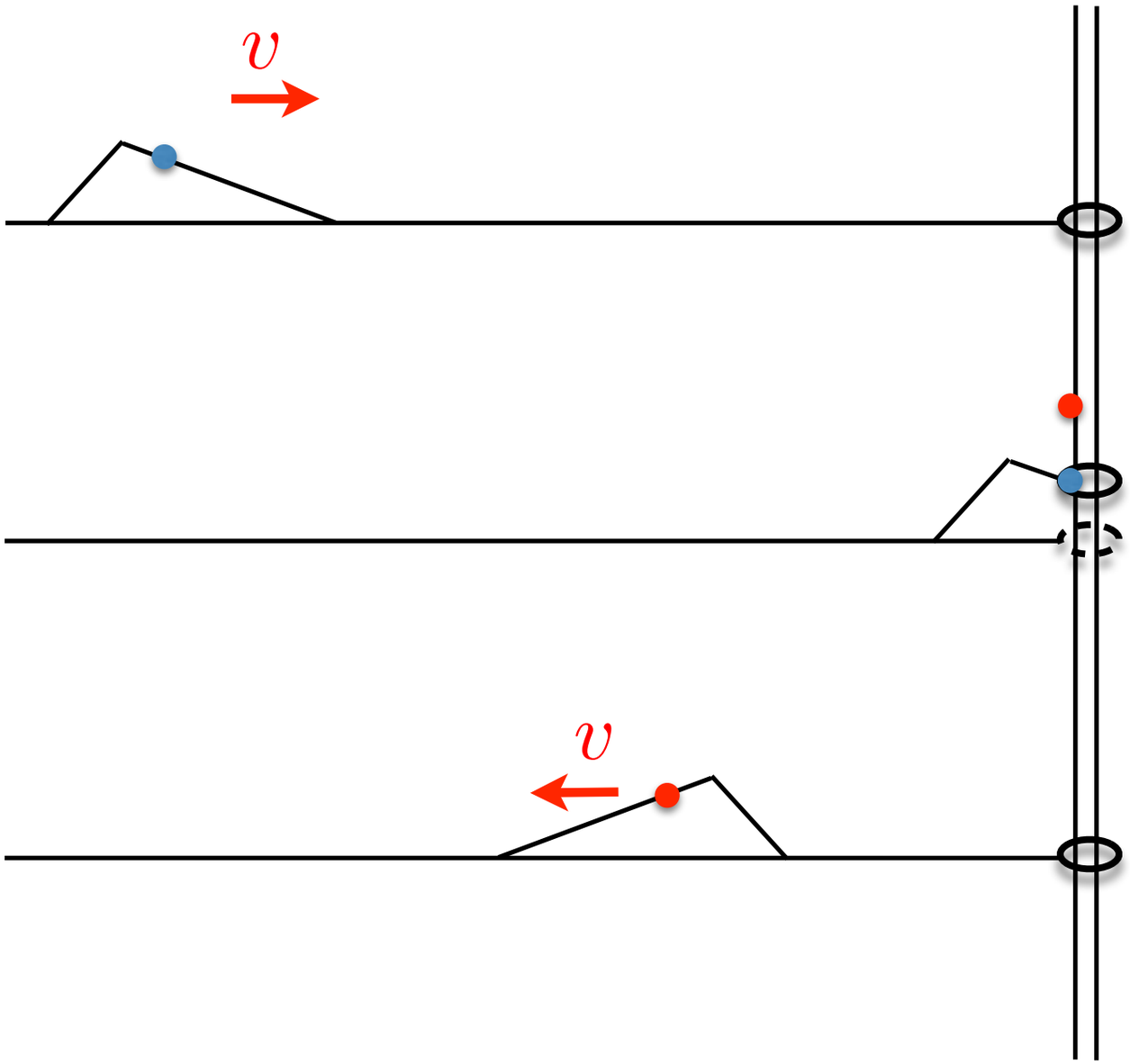
การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก (ปลายตรึง/ปิด)

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0, \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$



“ในการสะท้อนปลายตรึง คลื่นสะท้อนมีการกลับด้าน (จากบนเป็นล่าง ตามรูป) แต่รูปร่างเหมือนเดิม”

การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก (ปลายอิสระ/เปิด)



"ในการสะท้อนปลายอิสระ คลื่นสะท้อนจะวิ่งกลับด้านเดิม (ด้านบน ตามรูป) และรูปร่างเหมือนเดิม"

<u>พิเศษตรงบริเวณวงแหวนไร้มวล</u>

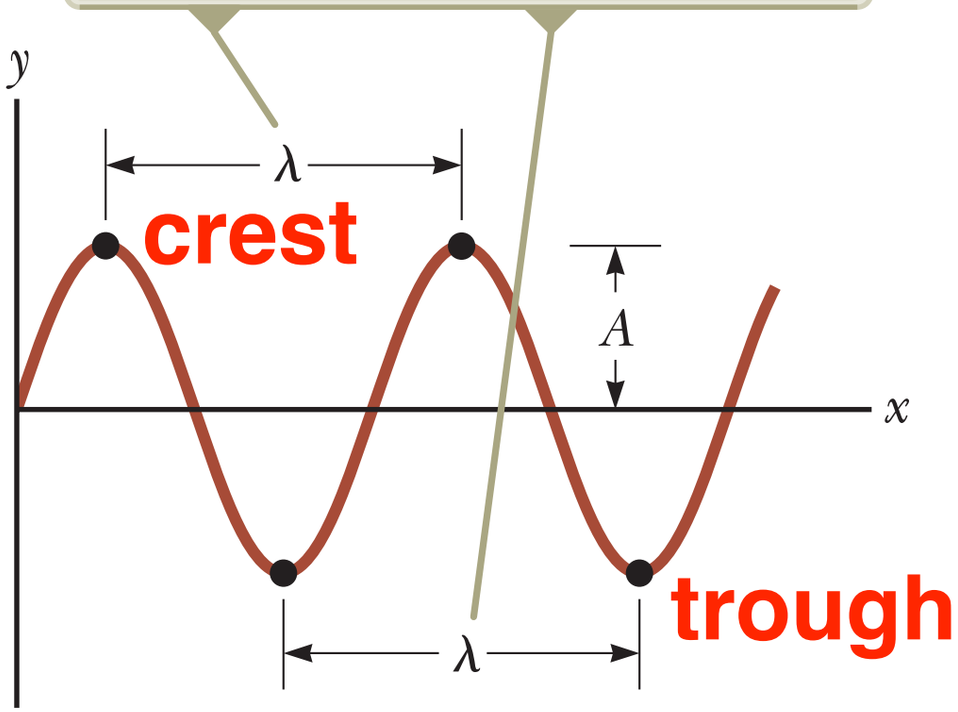
วงแหวนได้ผลจากคลื่นที่เข้ามาในขณะเดียวกันก็สร้างคลื่นที่มี Amplitude เดียวกันไปพร้อม ๆ กัน บริเวณนี้เราจะเห็นคลื่นมี Amplitude เป็น 2 เท่าของของเดิม

การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก (แบบจำลอง)

http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string

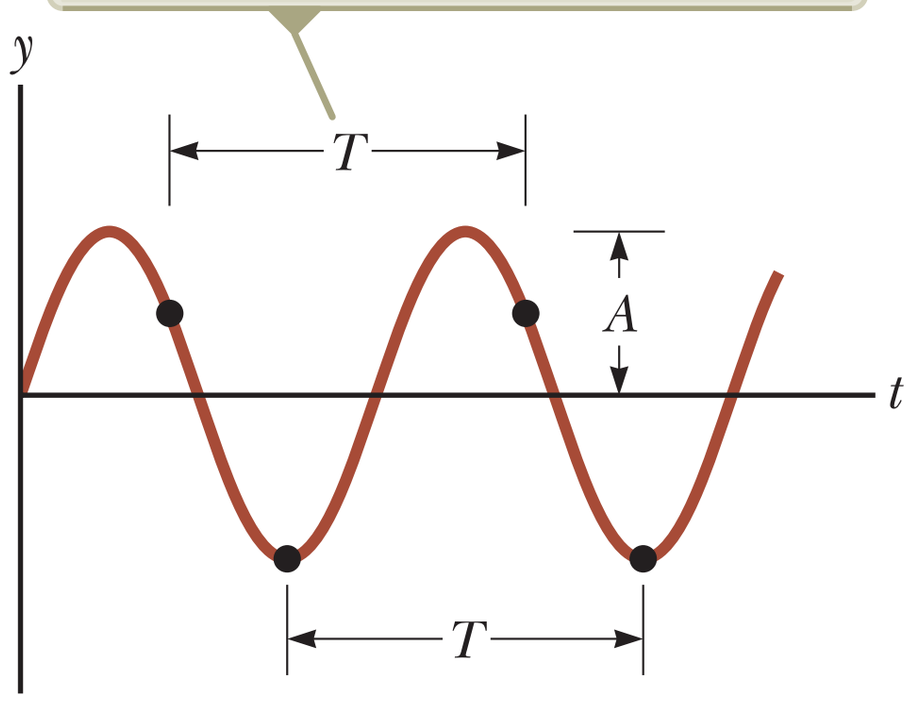
คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)

The wavelength λ of a wave is the distance between adjacent crests or adjacent troughs.



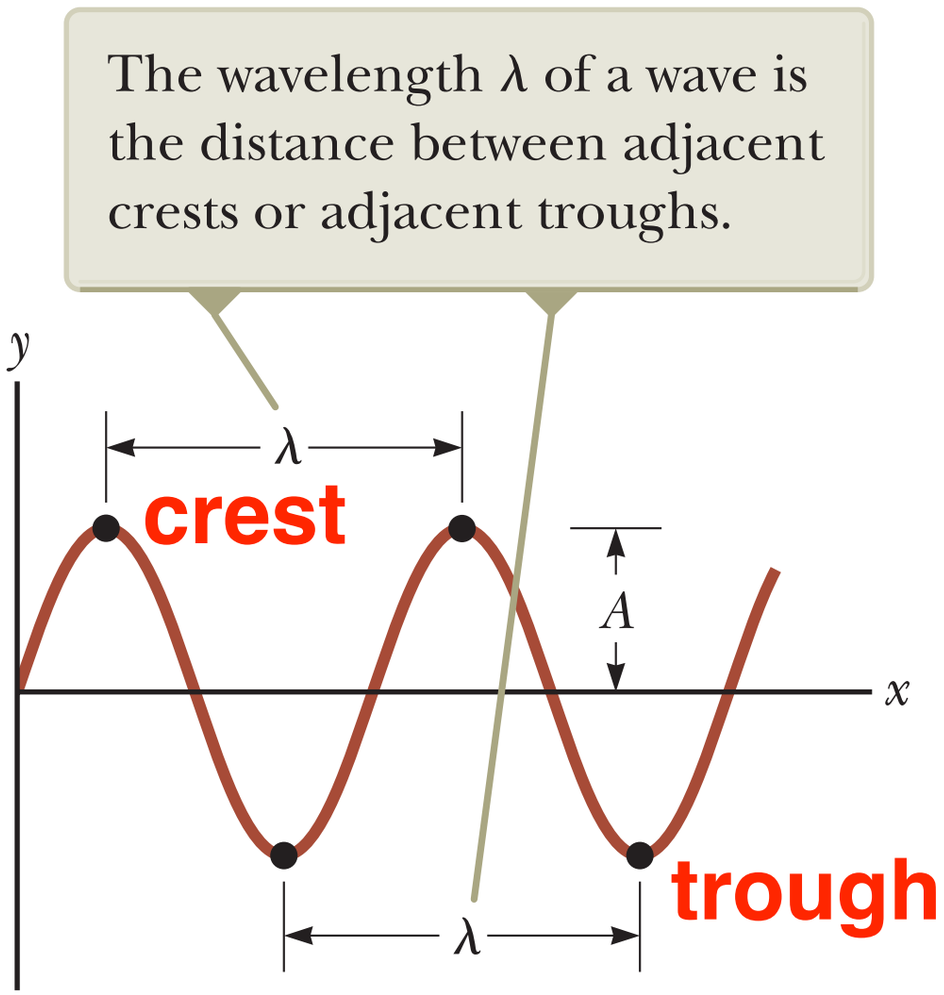
ตำแหน่งของกลุ่มของอนุภาค ในเวลาหนึ่ง ๆ

The period T of a wave is the time interval required for the element to complete one cycle of its oscillation and for the wave to travel one wavelength.



ตำแหน่งของอนุภาคตัวหนึ่ง ในเวลาต่าง ๆ

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



ตำแหน่งของกลุ่มของอนุภาค ในเวลาหนึ่ง ๆ

$x + vt$ คลื่นไปทางซ้าย

$x - vt$ คลื่นไปทางขวา

พิจารณาที่เวลา t = 0

$$y(x,0) = A\sin(ax)$$

$$y(0,0) = A\sin(a0) = 0$$

$$y(\frac{\lambda}{2},0) = A\sin(a\frac{\lambda}{2}) = 0$$

$$a = \frac{2\pi}{\lambda}$$

สมการจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

เราสามารถเขียนสมการคลื่นที่เวลา t = 0

$$y(x,0) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

เราสามารถเขียนสมการคลื่นที่เวลา t ใด ๆ

$$y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt)\right)$$

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)

รูปแบบของสมการที่เราได้สามารถเป็นคำตอบของฟังก์ชั่นคลื่นได้

$$\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial^2 t} = \frac{\partial^2 y}{\partial^2 x}$$

เป็นหนึ่งในคำตอบได้

$$y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt)\right)$$

นิยาม

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$$ **Angular wave number (wave number)** บอกถึงจำนวนของคลื่นในความยาวหนึ่ง ๆ (ในที่นี้คือ 2π)

$$\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$ **Angular frequency**

เขียนฟังก์ชั่นคลื่นใหม่ได้ว่า

$$y(x,t) = A\sin(kx \pm \omega t)$$

$kx \pm \omega t$: **phase**

เขียนให้ทั่วไปมากขึ้น $kx \pm \omega t + \phi$: **phase constant**

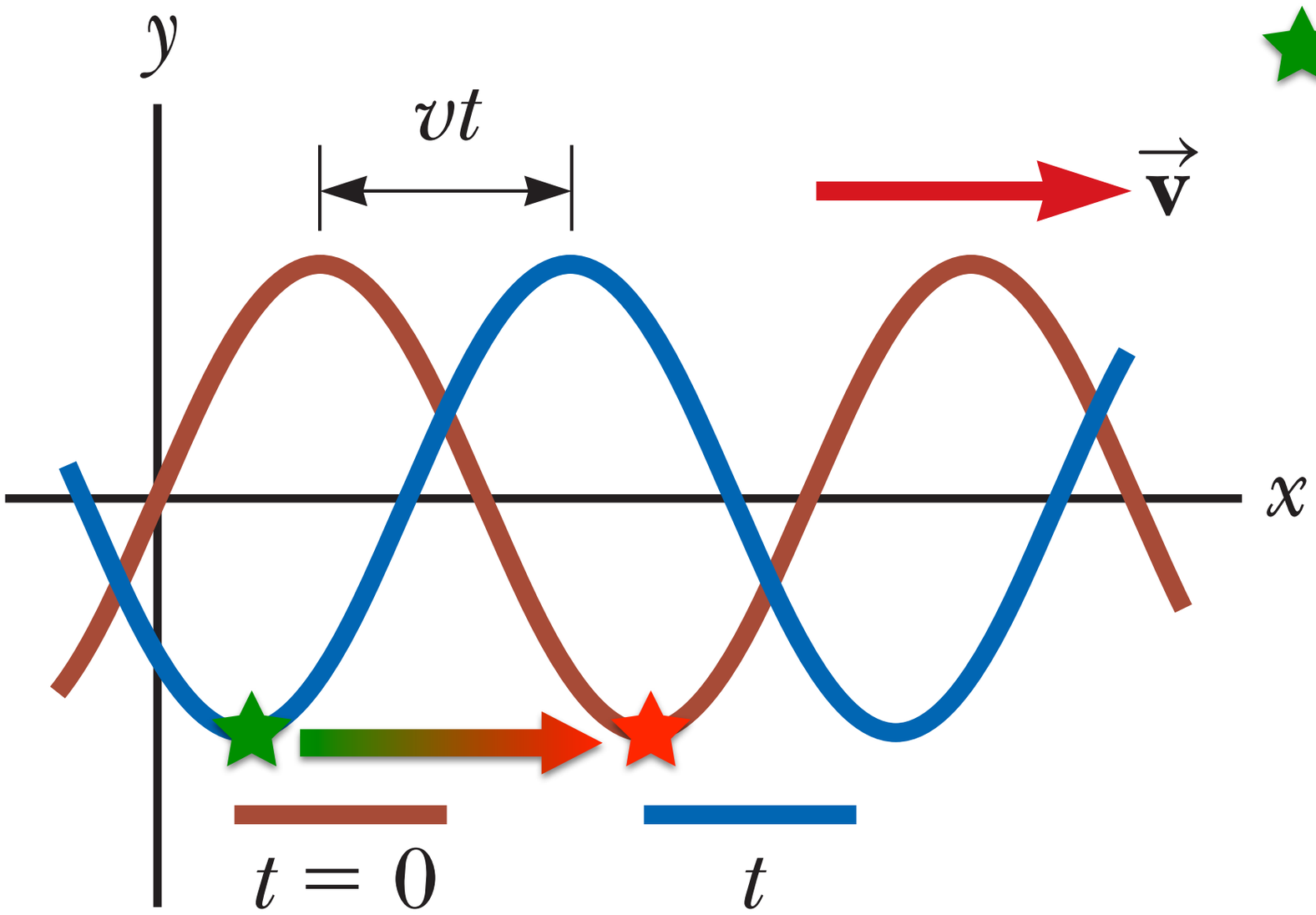
Phase velocity **อัตราเร็วเฟส**

$$v = f\lambda = \frac{\omega}{k}$$

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)

อัตราเร็วเฟส กับอัตราเร็วของอนุภาค ในตัวกลางไม่เหมือนกัน

เราสามารถหาความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ไป ในตัวกลางได้โดย
การพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งที่มีเฟสเท่ากัน



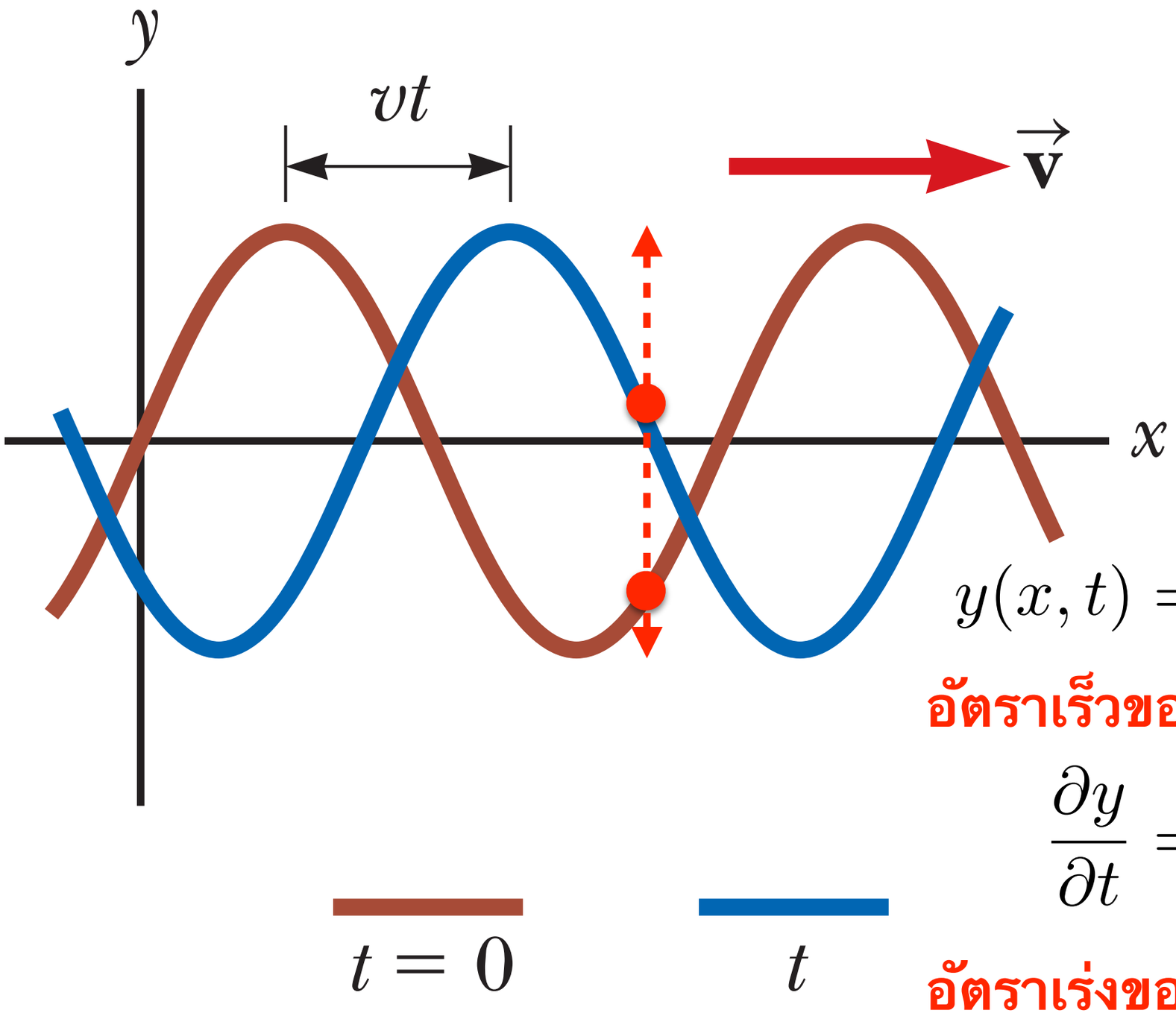
$$kx_0 = kx - \omega t$$

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$k\frac{dx}{dt} = \omega$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = f\lambda$$

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



"คลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวา

แต่

ตัวกลางของคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็น SHM"

$$y(x,t) = A\sin(kx \pm \omega t)$$

อัตราเร็วของการสั่น<u>ของอนุภาค</u> ในตัวกลาง

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \pm\omega A\cos(kx \pm \omega t)$$

อัตราเร่งของการสั่น<u>ของอนุภาค</u> ในตัวกลาง

$$\frac{\partial^2 y}{\partial^t t} = \pm\omega^2 A\sin(kx \pm \omega t)$$

ตัวอย่าง

มีฟังก์ชั่นคลื่นอยู่ 3 ฟังก์ชั่นคือ

$$(\mathrm{a})\, y(x,t) = 2\sin(4x - 2t)$$
$$(\mathrm{b})\, y(x,t) = \sin(3x - 4t)$$
$$(\mathrm{c})\, y(x,t) = 3\sin(3x - 3t)$$

(1) จงเรียงลำดับคลื่นตามอัตราเร็วเฟส จากมากไปน้อย
(2) จงเรียงลำดับอัตราเร็วสูงสุดของตัวกลาง จากมากไปน้อย

ตัวอย่าง

คลื่น ในเส้นเชือกมีสมการการกระจัดของอนุภาคเส้นเชือก ในหน่วยเมตรเป็น

$$y(x,t) = 15\sin\left(\frac{\pi}{16}(2x - 64t)\right)$$

จงหา

(1) อำพน (Amplitude)

(2) ความยาวคลื่น

(3) คาบ

(4) อัตราเร็วเฟส

(5) อัตราเร็วสูงสุดของอนุภาคตัวกลาง ในเส้นเชือกนี้

(6) อัตราเร็วของอนุภาคตัวกลางที่ตำแหน่ง 6 m ณ เวลา 0.25 วินาที

(7) อัตราเร่งของอนุภาคตัวกลางที่ตำแหน่ง 6 m ณ เวลา 0.25 วินาที

ตัวอย่าง

คลื่นรูปไซต์วิ่งไปในทิศ +x มีค่าอำพล (Amplitude) เท่ากับ 15 ซม. มีความยาวคลื่น 40 ซม. และมีความถี่ 8 เฮิร์ต ณ เวลา t=0 การกระจัดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง x=0 คือ 15 ซม.ตามรูป จงหา

(1) เลขคลื่น (k)

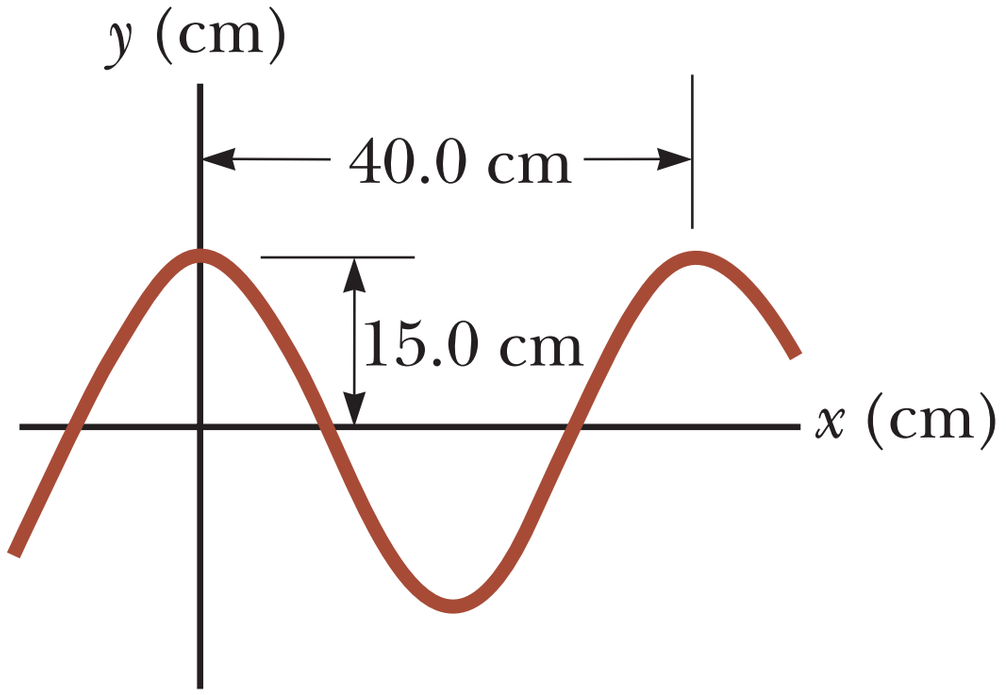
(2) คาบ

(3) ความถี่เชิงมุม

(4) อัตราเร็วเฟส

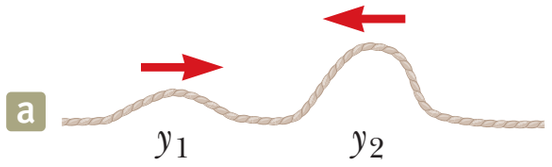
(5) ค่าคงที่ของเฟส (phase constant)

(6) ฟังก์ชั่นคลื่นของคลื่นนี้

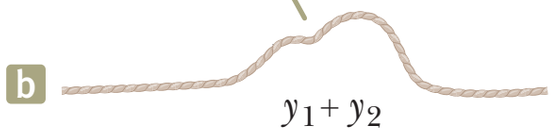


การรวมกันของคลื่น (Superposition of waves)

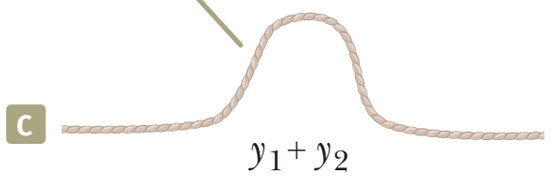
$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$



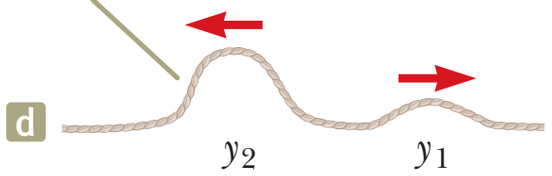
When the pulses overlap, the wave function is the sum of the individual wave functions.

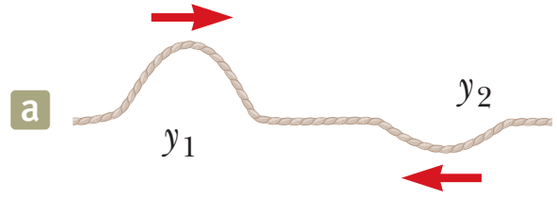


When the crests of the two pulses align, the amplitude is the sum of the individual amplitudes.

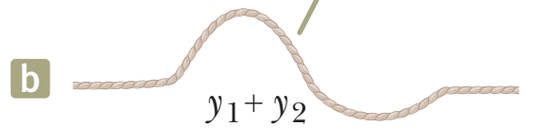


When the pulses no longer overlap, they have not been permanently affected by the interference.

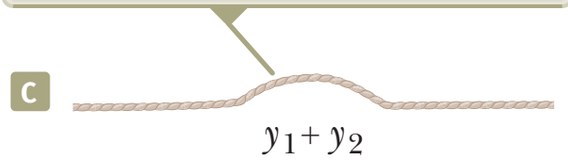




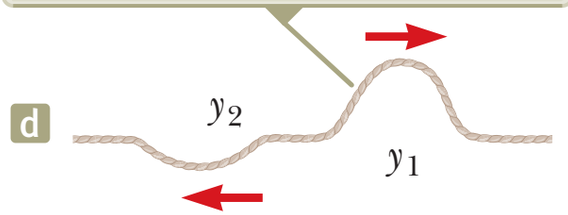
When the pulses overlap, the wave function is the sum of the individual wave functions.



When the crests of the two pulses align, the amplitude is the difference between the individual amplitudes.



When the pulses no longer overlap, they have not been permanently affected by the interference.



การรวมกันของคลื่น (Superposition of waves)

พิจารณา ในกรณีที่คลื่น 2 ขบวนวิ่งไปทางขวาเหมือนกัน มีความถี่เดียวกัน ความยาวคลื่นเท่ากัน และอำพล (Amplitude) เท่ากัน ต่างกันแค่เฟส

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t),\ y_2 = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

พิจารณาการรวมกันของคลื่นสองขบวนนี้

$$y = y_1 + y_2 = A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

ใช้สูตรทางตรีโกณมิติ

$$\sin a + \sin b = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

เราจะได้ว่า

$$y = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - wt + \frac{\phi}{2}\right)$$

การรวมกันของคลื่น (Superposition of waves)

คลื่นใหม่มีความถี่และความยาวคลื่นเท่าเดิม

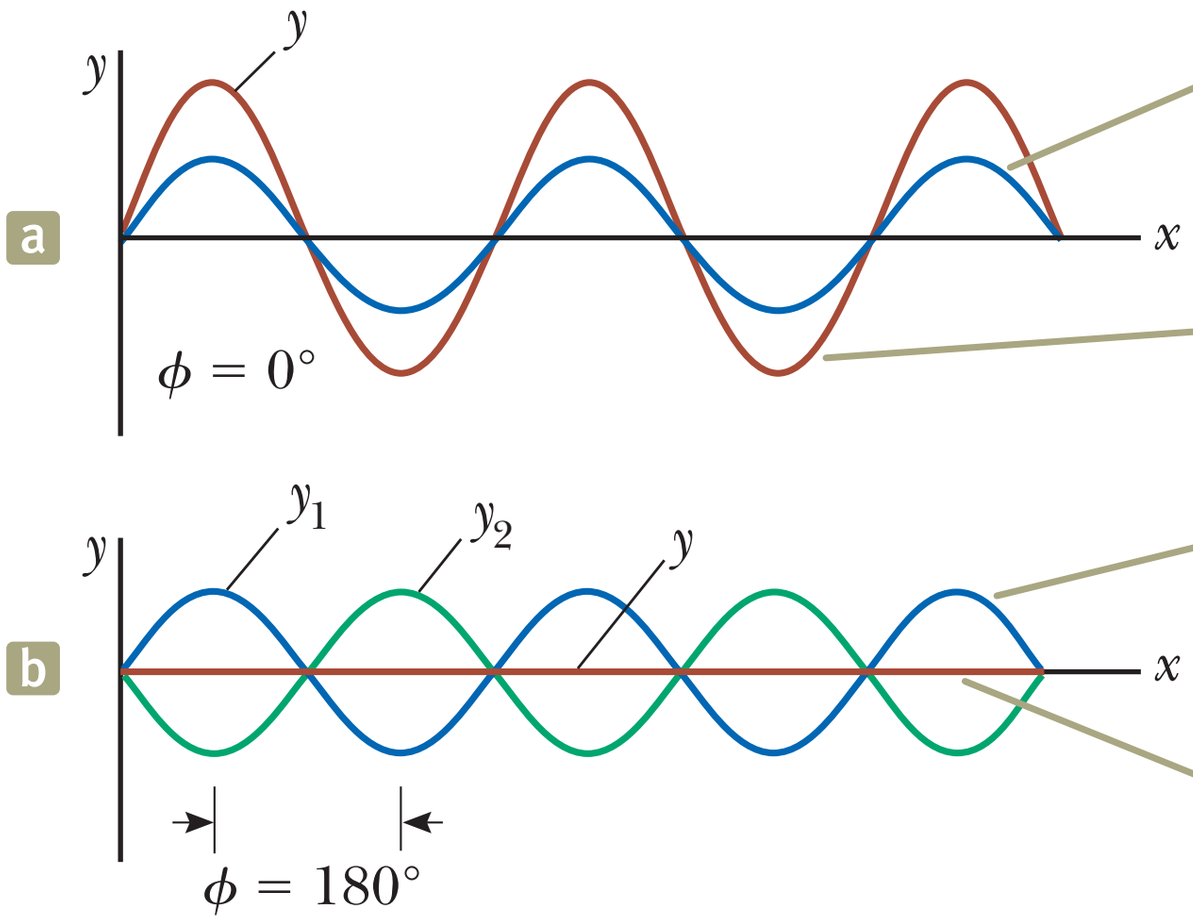
$$y = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - wt + \frac{\phi}{2}\right)$$

อัมพล (Amplitude) ลัพธ์มีค่าขึ้นอยู่กับความต่างเฟส

- คลื่นจะเสริมกันมากที่สุดเมื่อ $\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = \pm 1$ หรือ $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \ldots$
- คลื่นจะหักล้างกันมากที่สุดเมื่อ $\cos\left(\frac{\phi}{2}\right) = 0$ หรือ $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \ldots$

การรวมกันของคลื่น (Superposition of waves)

มีคลื่นสองขบวนคือ**สีเขียว**และ**สีฟ้า** คลื่นลัพท์คือ**สีเลือดหมู**



The individual waves are in phase and therefore indistinguishable.

Constructive interference: the amplitudes add.

The individual waves are 180° out of phase.

Destructive interference: the waves cancel.

This intermediate result is neither constructive nor destructive.

ตัวอย่าง

คลื่นรูปไซน์สองขบวนเหมือนกัน มีความยาวคลื่นเท่ากัน 3.00 m วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีอัตราเร็วเท่ากัน 2.00 m/s โดยคลื่นขบวนที่สองเกิดขึ้นที่เดียวกับคลื่นขบวนแรก แต่เกิดขึ้น ในภายหลัง อำพลลัพธ์ของการรวมการรวมกันของคลื่นทั้งสองขบวนมีขนาดเท่ากับอำพลของคลื่นขบวนแรก (หรือขบวนที่สอง) จงหาช่วงเวลาที่เป็นไปได้ของการเกิดคลื่นขบวนที่สองภายหลังจากการเกิดขึ้นของคลื่นขบวนแรก

คลื่นสถิต

พิจารณา ในกรณีที่คลื่น 2 ขบวนวิ่งสวนทางกัน โดยคลื่นทั้งสองขบวนมีความถี่เดียวกัน ความยาวคลื่นเท่ากัน และอำพล (Amplitude) เท่ากัน

$$y_1 = A\sin(kx - \omega t),\ y_2 = A\sin(kx + \omega t)$$

พิจารณาการรวมกันของคลื่นสองขบวนนี้

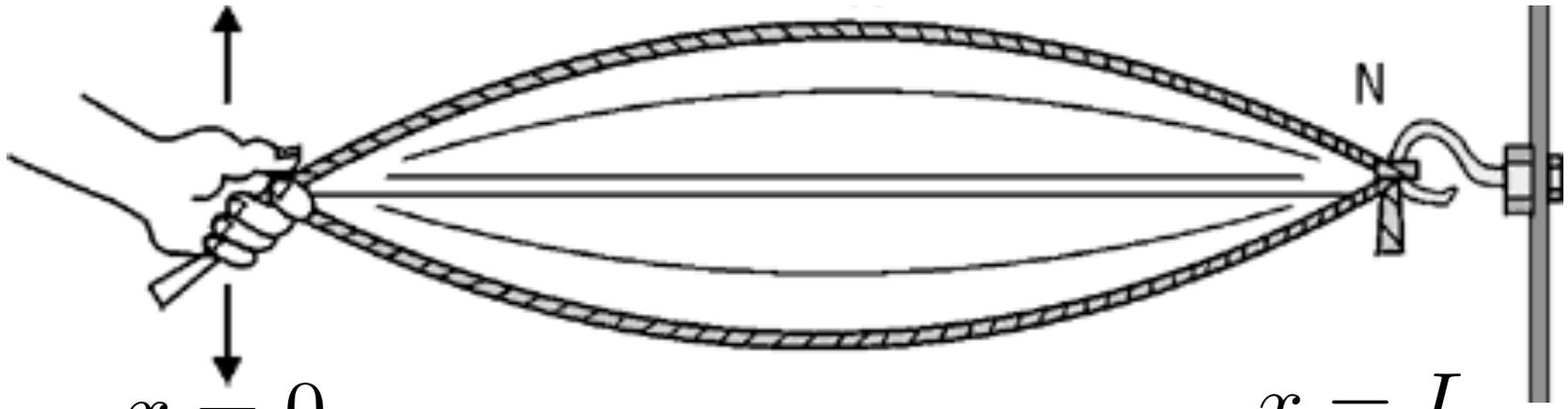
$$y = y_1 + y_2 = A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx + \omega t)$$

$$\boxed{y = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)}$$

ถ้า $\sin(kx) = 0$ จุดนั้นก็จะไม่เคลื่อนที่เลยไม่ว่าจะในเวลาใด ๆ เราเรียกคลื่นลักษณะนี้ว่าคลื่นสถิต (Standing wave)

คลื่นนิ่ง

เงื่อนไขที่เราพิจารณาคือปลายทั้งสองเป็นปลายตรึง ไม่มีการเคลื่อนที่



$x = 0$

$\sin(k \cdot 0) = 0$

$x = L$

$\sin(k \cdot L) = 0$

$kL = n\pi; n = 1, 2, \ldots$

$$k_n = \frac{n\pi}{L}$$

$$\lambda_n = \frac{2\pi}{k_n} = \frac{2L}{n}$$

$$\omega_n = k_n v = \frac{n\pi v}{L}$$

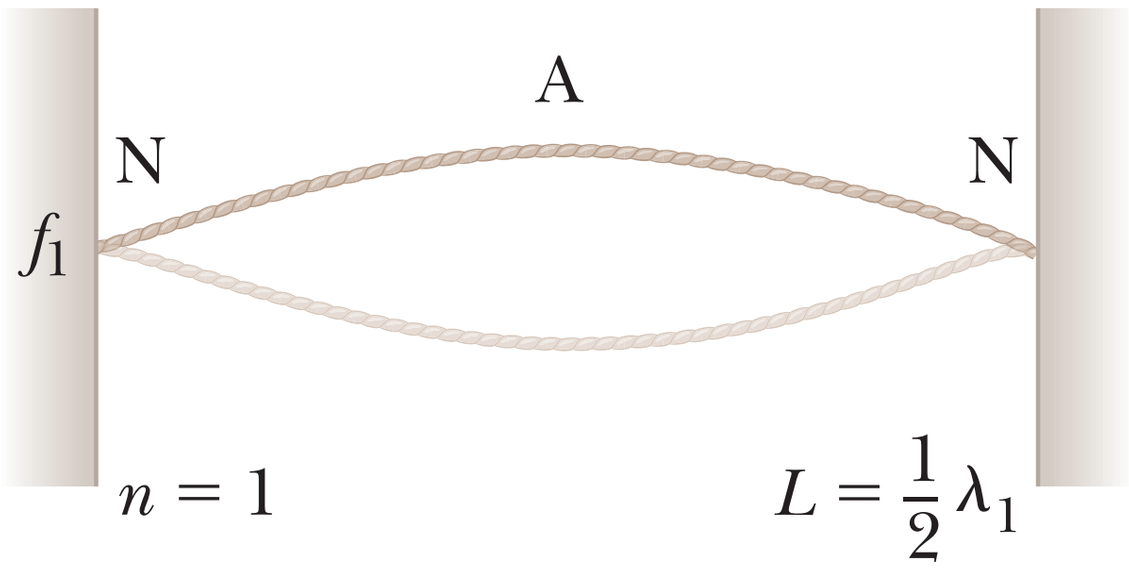
$$f_n = \frac{nv}{2L}$$

คลื่น ในเส้นเชือก

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

คลื่นนิ่ง

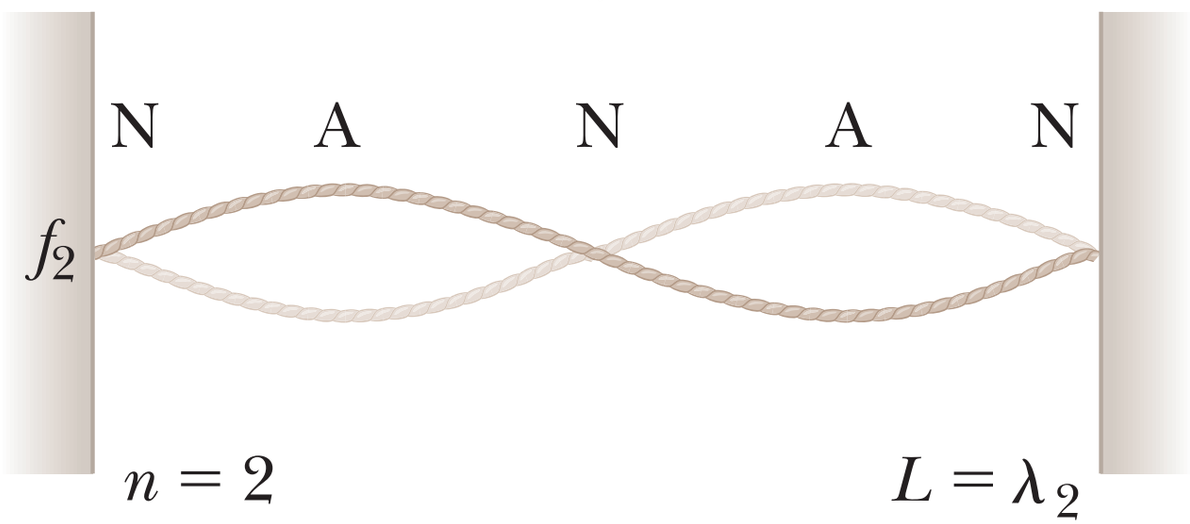
Fundamental, or first harmonic



$n = 1$

$L = \frac{1}{2}\lambda_1$

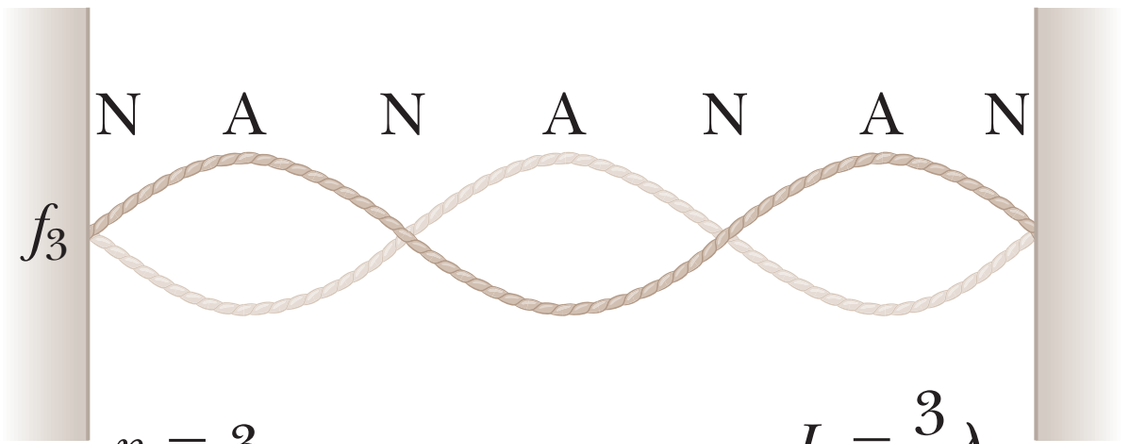
Second harmonic



$n = 2$

$L = \lambda_2$

Third harmonic



$n = 3$

$L = \frac{3}{2}\lambda_3$

ตัวอย่าง

คลื่นสถิตในเส้นเชือกมีสมการการกระจัดในหน่วยเมตรเป็น

$$y(x,t) = 0.50 \sin\left(\frac{\pi}{3}x\right) \cos(40\pi t)$$

จงหา

(1) อำพน (Amplitude)

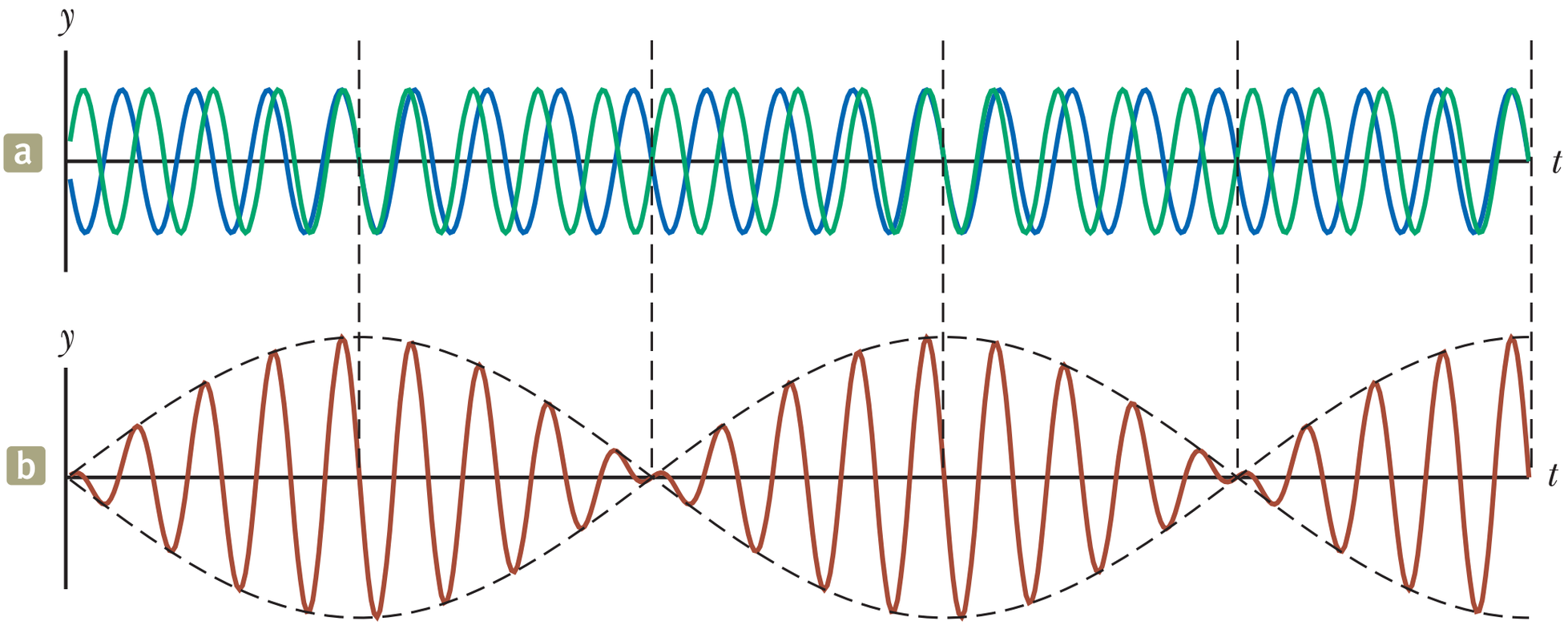
(2) อัตราเร็วเฟส

(3) ระยะห่างจะหว่างจุดบัพ 2 บัพ

(4) อัตราเร็วของอนุภาคตัวกลางที่ตำแหน่ง 1.5 ซม. ณ เวลา 9/8 วินาที

บีสต์ (Beat)

พิจารณากรณีที่คลื่น 2 ขบวนมาร่วมกัน โดยคลื่นทั้งสองขบวนมีความถี่ต่างกันเล็กน้อย

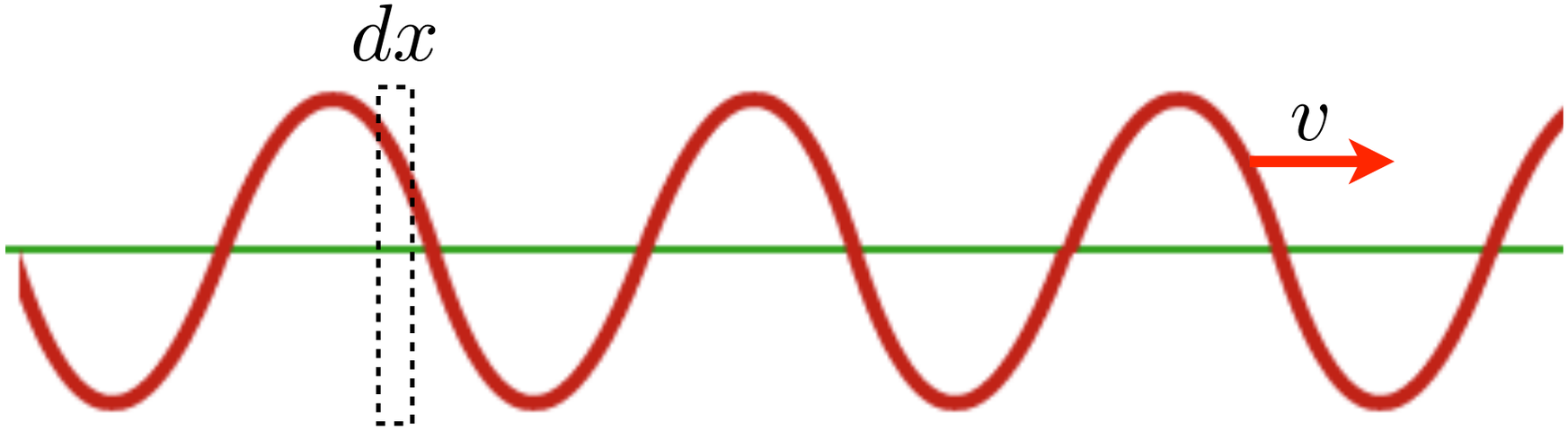


$$f_{\text{beat}} = |f_1 - f_2|$$

ตัวอย่าง

สายเปียโนเหมือนกันสองเส้น มีความยาว 0.750 m ให้ความถี่เท่ากันพอดีที่ 440 Hz. ถ้าความตึงของสายเส้นที่หนึ่งเพิ่มขึ้น 1.0% เมื่อใช้สายทั้งสองเส้นพร้อม ๆ กันจงหาความถี่บีสต์ระหว่างความถี่หลักมูล (fundamental frequency) ของสายเปียโนทั้งสอง

พลังงานของคลื่นในเส้นเชือก



$$T, \mu, v^2 = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$y(x,t) = A\sin[k(x-vt)]$$

พิจารณาพลังงานจลน์ของก้อนมวล dm ที่แกว่งขึ้นลง

$$dE_k = \frac{1}{2}(dm)v_y^2 \longleftarrow \frac{\partial y}{\partial t} = -Akv\cos[k(x-vt)]$$

$$dm = \mu dx$$

$$E_k = \frac{1}{2}\mu A^2 k^2 v^2 \boxed{\int_0^{\lambda} \cos^2 k(x-vt)\,\mathrm{d}x} = \frac{\lambda}{2}$$

$\frac{2\pi}{\lambda}$ $\sqrt{\frac{T}{\mu}}$

พลังงานของคลื่นในเส้นเชือก

พลังงานจลน์ของ 1 wavelength $E_k = \dfrac{A^2\pi^2 T}{\lambda}$

$$= \frac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

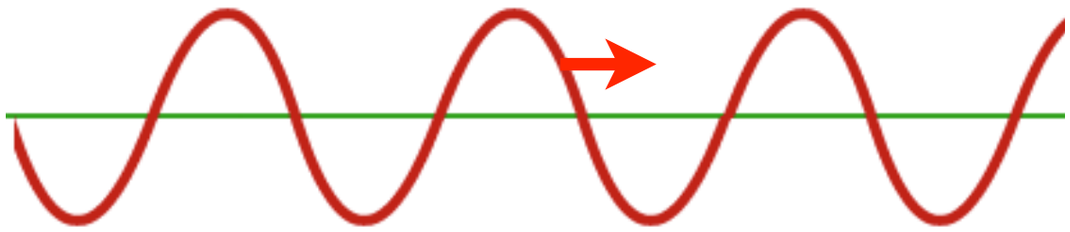
ในกรณีนี้พลังงานศักย์ของคลื่น 1 wavelength จะมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของคลื่น 1 wavelength

$$E_{total} = \frac{2A^2\pi^2 T}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

พลังงานของคลื่นในเส้นเชือก

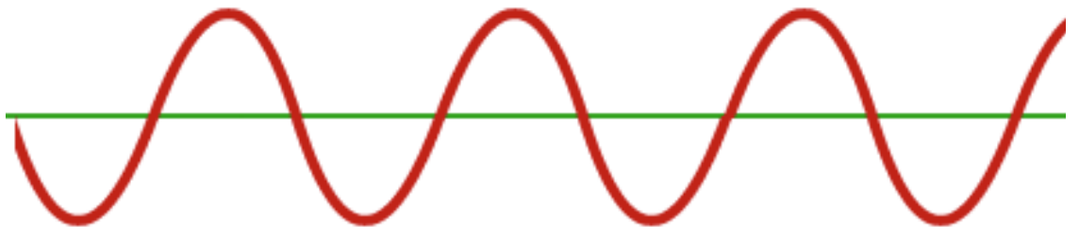
คลื่นที่เคลื่อนที่ไป
Traveling wave



พิจารณาพลังงาน ณ ขณะหนึ่ง ๆ

$$E_{total} = \frac{2A^2\pi^2T}{\lambda}$$

คลื่นสถิต
Standing wave



พิจารณาพลังงาน ณ ขณะหนึ่ง ๆ เลือกขณะที่<u>คลื่นกำลังจะเคลื่อนที่กลับทิศ (บนสุดกลับลงล่าง หรือล่างสุดจะขึ้นบน)</u> คลื่นจะมีแต่พลังงานศักย์เท่านั้น

$$E_{total} = \frac{A^2\pi^2T}{\lambda}$$

อัตราการส่งผ่านพลังงานของคลื่นในเส้นเชือก

กำลังเฉลี่ย หรืออัตราการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ย (ทั้งพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์)

$$
\begin{aligned}
P = \frac{E}{t} &= \frac{A^2\pi^2 T}{\lambda}\frac{v}{\lambda} \\
&= \frac{A^2\pi^2 T v}{\lambda^2} \\
&= \frac{1}{2}\mu v \omega^2 A^2
\end{aligned}
$$

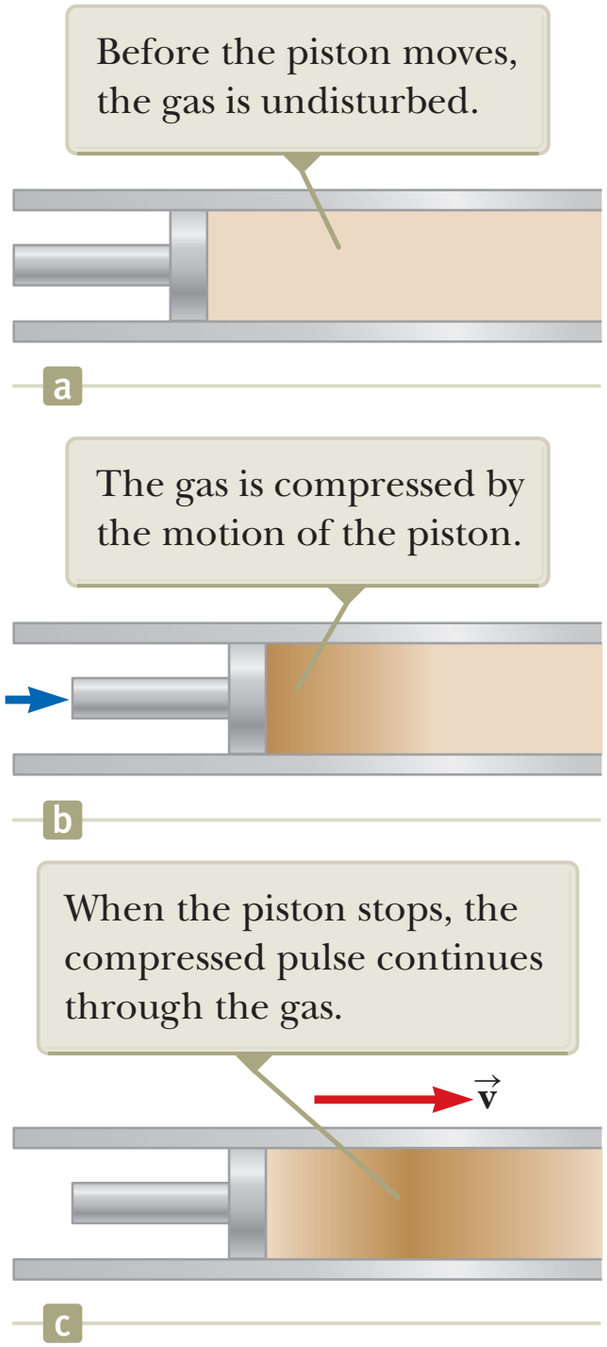
ตัวอย่าง

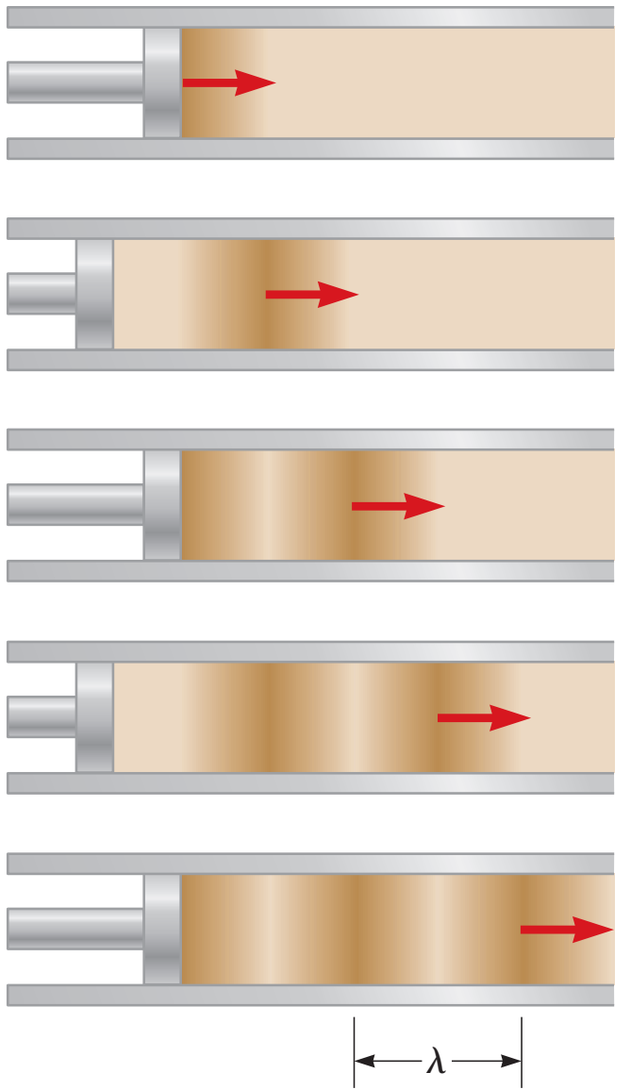
ลวดเส้นหนึ่งมีมวลต่อหน่วยความยาว 525 g/m มีความตึง 45N ถ้าปล่อยคลื่นที่มีความถี่ 120 Hz และมีอำพน 8.5 mm ให้เคลื่อนที่บนเส้นลวด คลื่นจะส่งผ่านพลังงานด้วยอัตราเท่าไหร่

ตัวอย่าง

จงพิสูจน์กฎการอนุรักษ์พลังงาน ในกรณีที่คลื่นสองขบวนวิ่งสวนทางกัน แล้วเกิดเป็นคลื่นสถิต

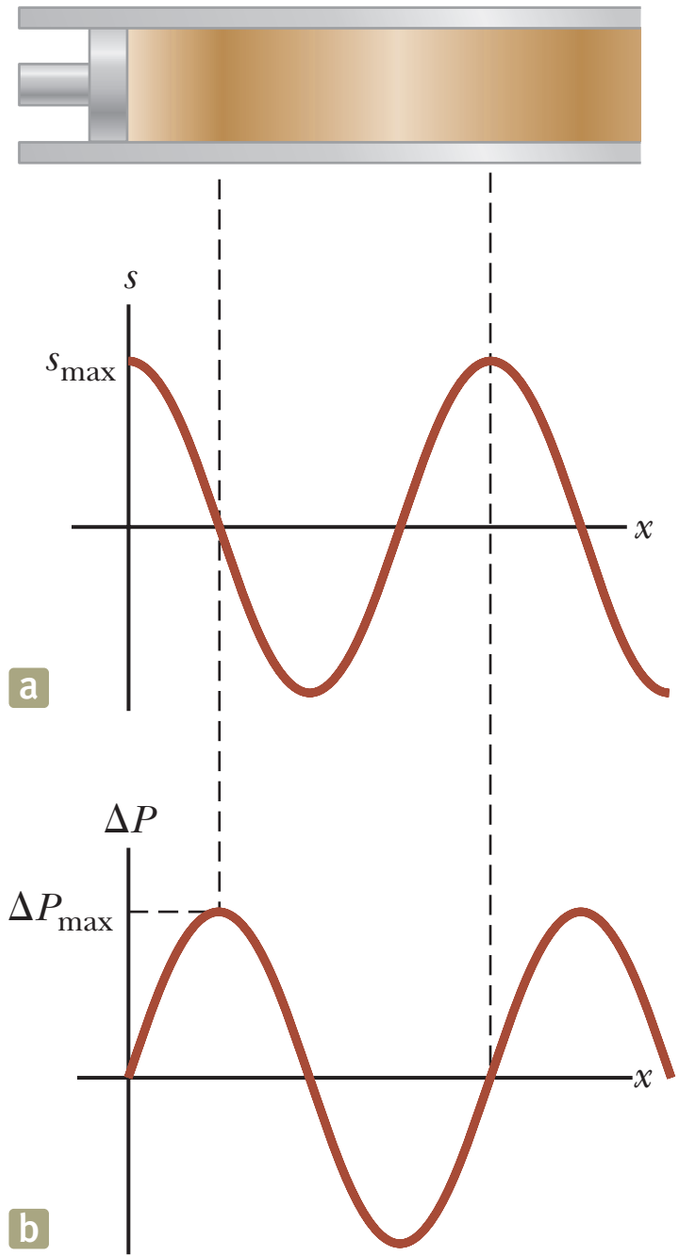
คลื่นเสียง



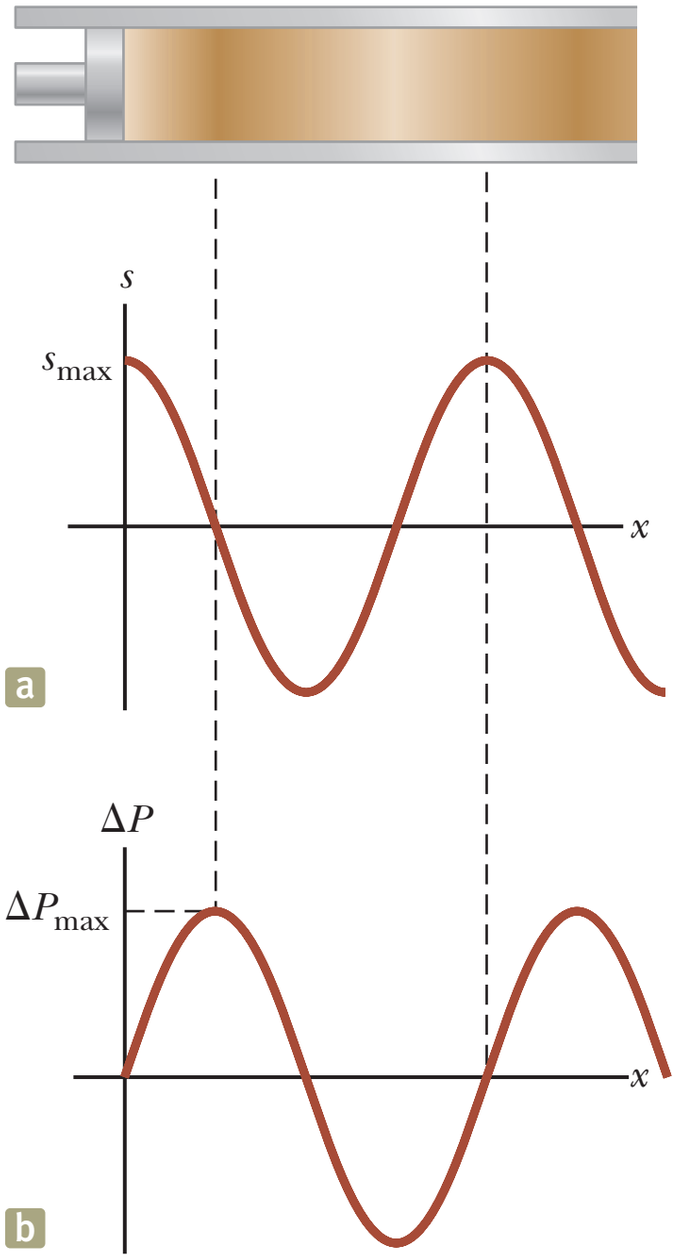


การกระจัดสูง ความดันต่ำ

การกระจัดต่ำ ความดันสูง



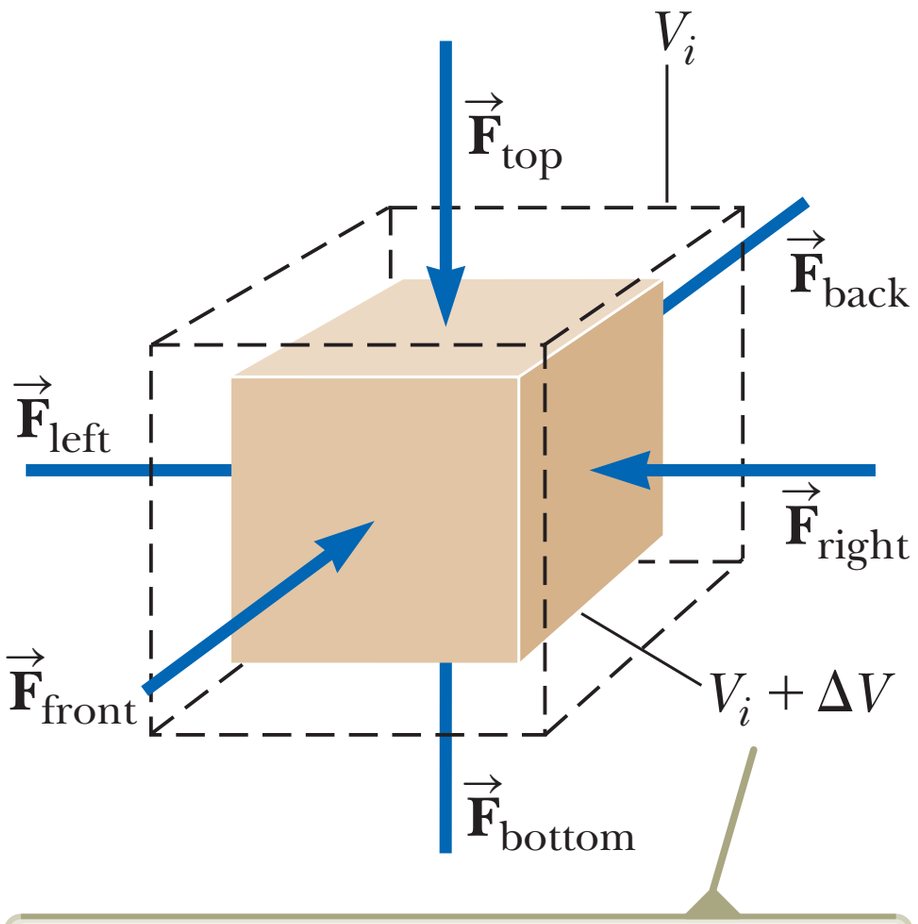
คลื่นเสียง



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

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

Bulk Modulus



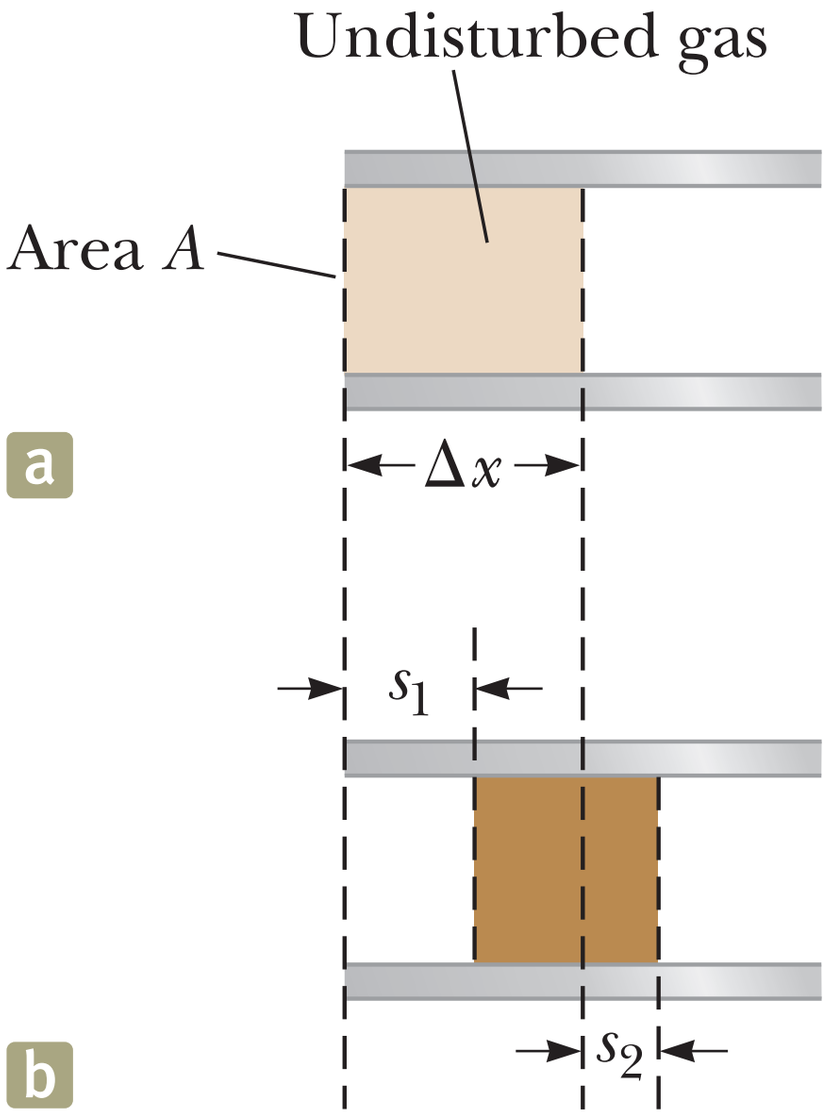
The cube undergoes a change in volume but no change in shape.

การเปลี่ยนแปลงของความดัน

$$B \equiv \frac{\text{volume stress}}{\text{volume strain}} = -\frac{\Delta F/A}{\Delta V/V_i} = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V_i}$$

การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

คลื่นเสียง



$$\Delta P = -B\frac{\Delta V}{V_i}$$

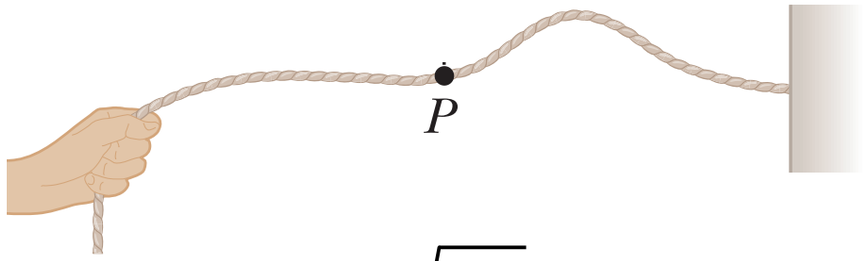
$$= -B\frac{A\Delta s}{A\Delta x}$$

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

$$= Bs_{\max}k\sin(kx - \omega t)$$

อัตราเร็วของคลื่น

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



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

$$\sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

ความเข้มเสียงและเดซิเบล (Intensity & Decibel)

ความเข้มเสียงนิยามโดย

$$I = \frac{P}{A}$$

อัตราการส่งผ่านพลังงาน

พื้นที่ซึ่งเสียงตกกระทบ

$$I = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_{\max}^2$$

ระดับเสียงนิยามโดย

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 1.0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$$

ตัวอย่าง

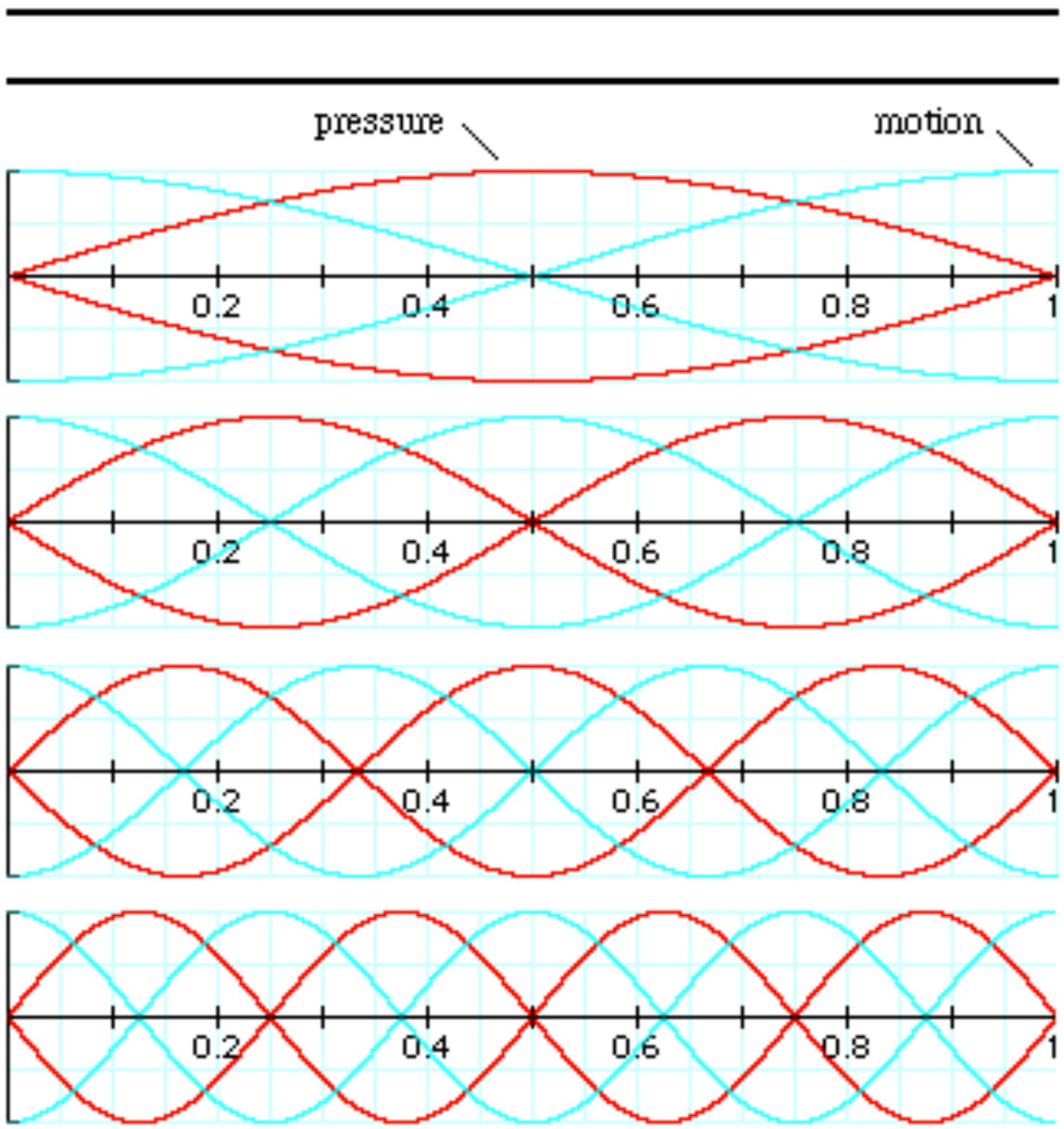
เครื่องจักรสองเครื่องวางห่างจากคนทำงานเป็นระยะทางเท่ากัน โดยแต่ละเครื่อง ให้ความเข้มเสียงบริเวณที่คนทำงานเท่ากับ 2.0×10^{-7} W/m^2

(1) จงหาระดับเสียงที่คนทำงานจะได้ยินเมื่อเครื่องจักรเครื่องที่หนึ่งทำงาน

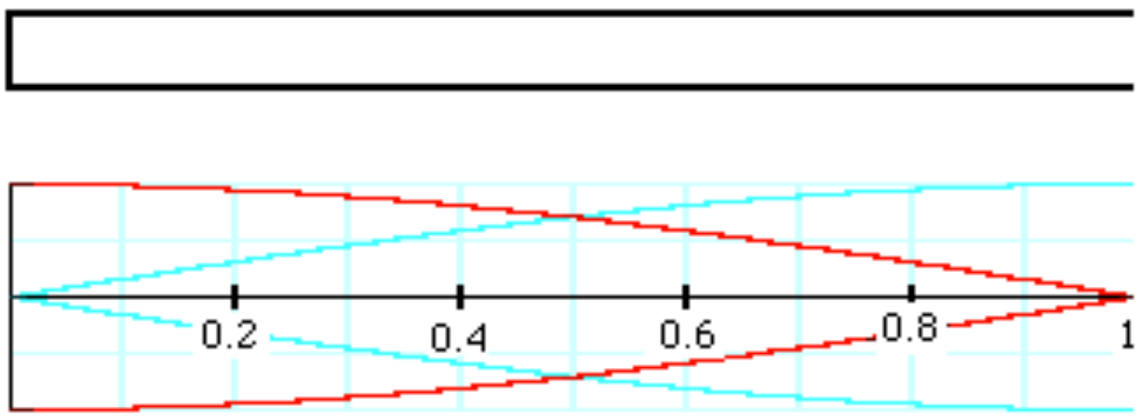
(2) จงหาระดับเสียงที่คนทำงานจะได้ยินเมื่อเครื่องจักรทั้งสองเครื่องทำงาน

คลื่นนิ่งภายในท่อปลายเปิดและปลายปิด

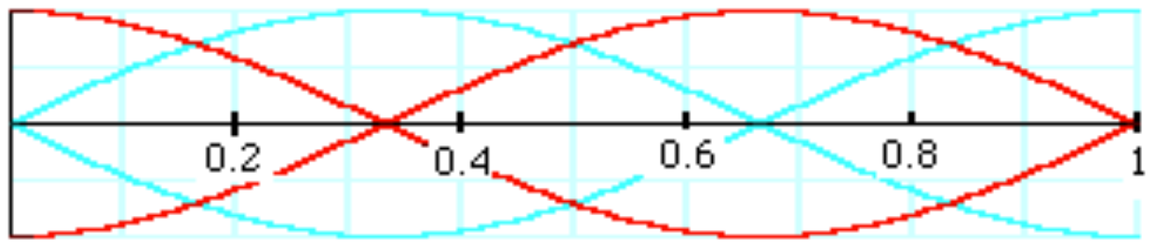
ปลายเปิดสองด้าน



ปลายเปิดหนึ่งด้าน ปิดหนึ่งด้าน



(even harmonics
are absent)

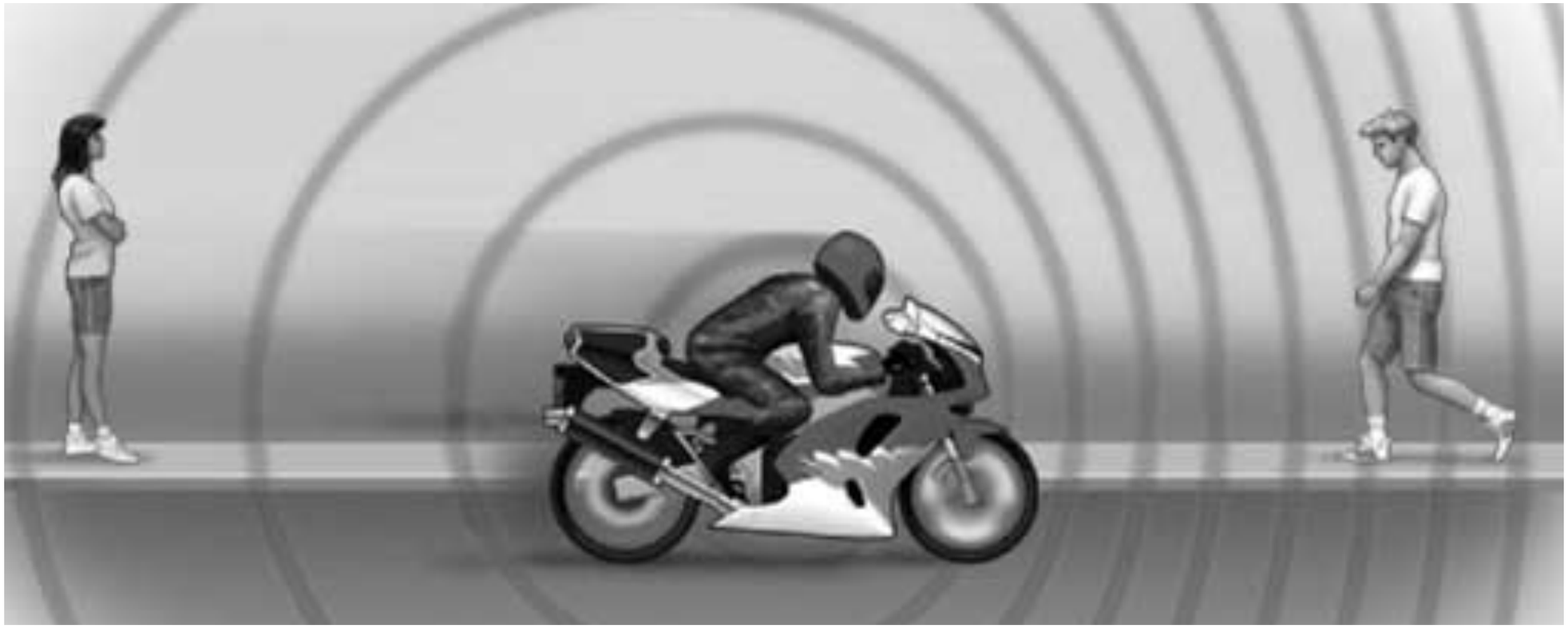


www.phys.unsw.edu.au/music

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความยาวท่อเป็นอย่างไร

ดอปเปลอร์ (Doppler)

เมื่อต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นที่มีความถี่ต่างไปจากการการที่ต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตอยู่นิ่ง



อัตราเร็วของเสียง ในตัวกลาง (อากาศ ในกรณีนี้)

$$f' = f\left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_s}\right)$$

$+v_0, -v_s$ ต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหากัน

$-v_0, +v_s$ ต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกจากกัน

ตัวอย่าง

นักประดาน้ำกลุ่ม ก ว่ายน้ำไปด้วยความเร็ว 8 m/s และปล่อยคลื่นโซน่าร์ (SONAR, SOund Navigation And Ranging) ด้วยความถี่ 1400 Hz ให้ความเร็ว ในการเคลื่อนที่ของเสียง ใต้น้ำเป็น 1533 Hz จงหาว่า

(1) เมื่อมีกลุ่มนักประดาน้ำ ข ว่ายน้ำเข้าหากลุ่ม ก ด้วยความเร็ว 9 m/s ความถี่ของคลื่นโซน่าร์ที่กลุ่ม ข จะรับได้มีค่าเท่า ใด

(2) หากทั้งสองกลุ่มคลาดกัน และว่ายออกห่างจากกัน ความถี่ของคลื่นโซน่าร์ที่กลุ่ม ข จะรับได้มีค่าเท่า ใด