Updated: Oct 3, 2017

Wave motion and sound waves

N. Srimanobhas
Norraphat.Srimanobhas@cern.ch

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

Contents

- **Wave motion and sound waves**
  - Propagation of a disturbance & types of mechanical waves
  - Wave function & wave equation
  - Sinusoidal wave
  - Rate of energy transfer by sinusoidal wave on string
  - Sound wave
    - ➡ Speed of sound wave
    - ➡ Intensity of periodic sound wave
    - ➡ Doppler effect

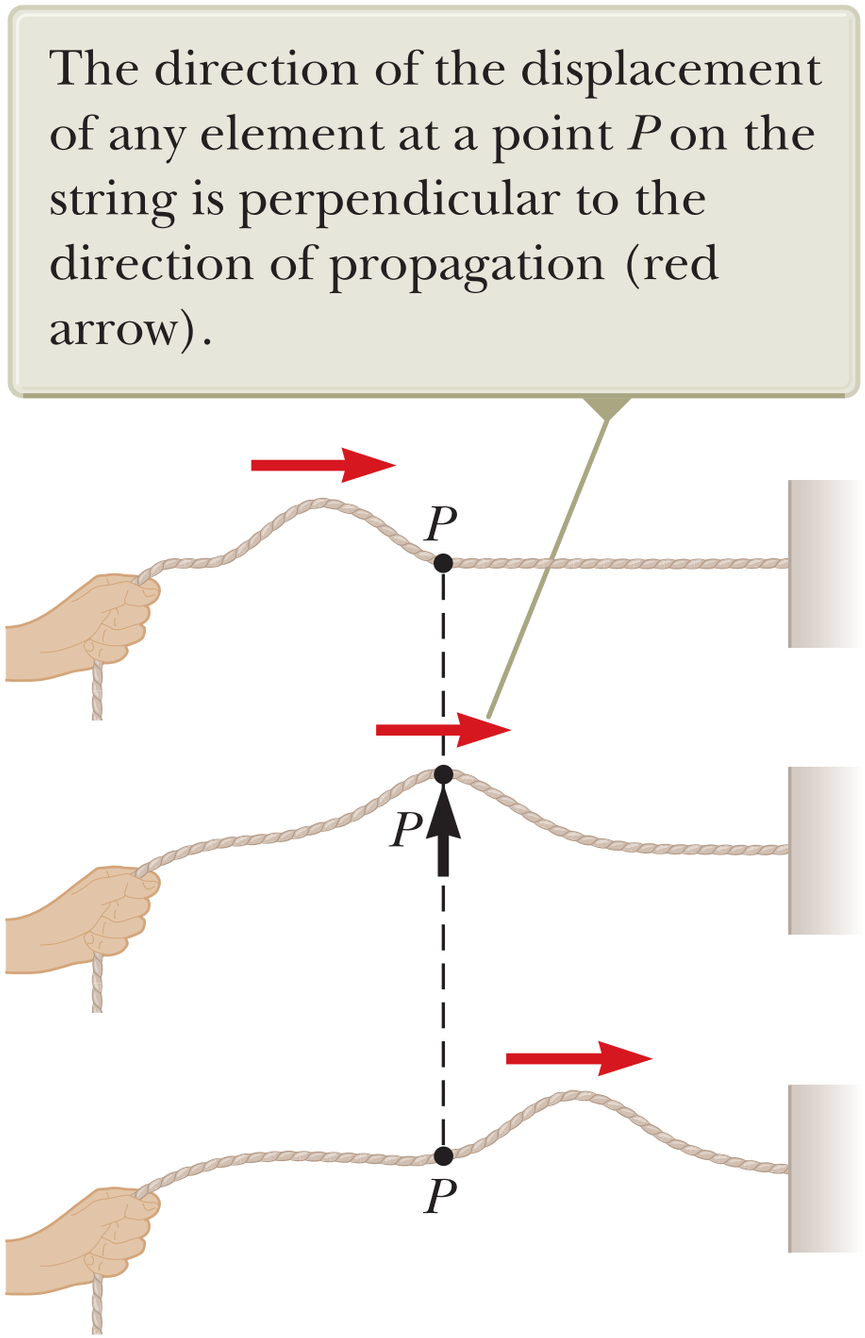
นิสิตควรทำแบบฝึกหัดทุกข้อ ในเอกสารนี้ ให้ได้เอง
และฝึกทำแบบฝึกหัดท้ายบทของหนังสืออ้างอิงเพิ่มเติม

คลื่นกล (Mechanical wave)

คลื่นที่เคลื่อนที่ไปโดยการสั่นของตัวกลาง มีการส่งผ่านพลังงานไปในตัวกลาง

- ต้องมีการรบกวนระบบ (ใส่พลังงานเข้าไป ในระบบ)
- ต้องอาศัยตัวกลาง แต่ตัวกลาง**ไม่ได้เคลื่อนที่ตามคลื่น แต่จะสั่นไปมารอบจุดสมดุล**
- การเคลื่อนทีของคลืนจะส่งผ่านพลังงานจากบริเวณหนึง ๆ ของตัวกลางไปสู่บริเวณอื่น ๆ

คลื่นตามขวาง (Transverse wave)



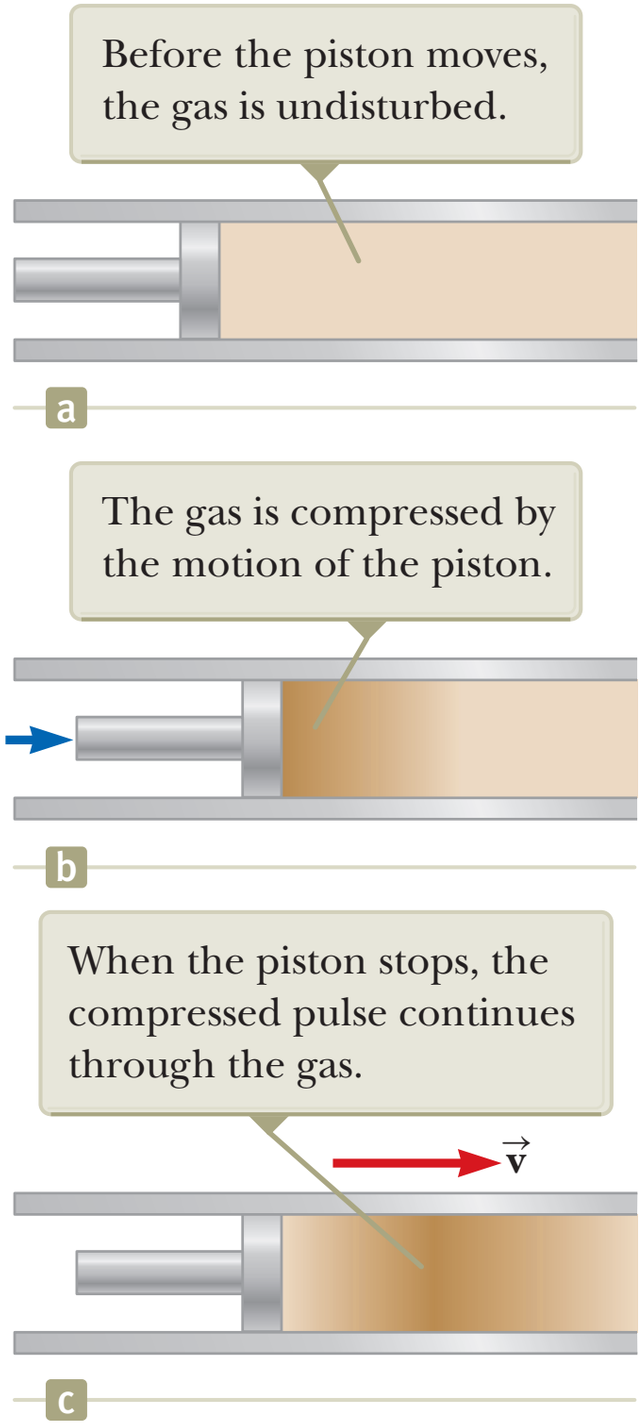
อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างเช่น

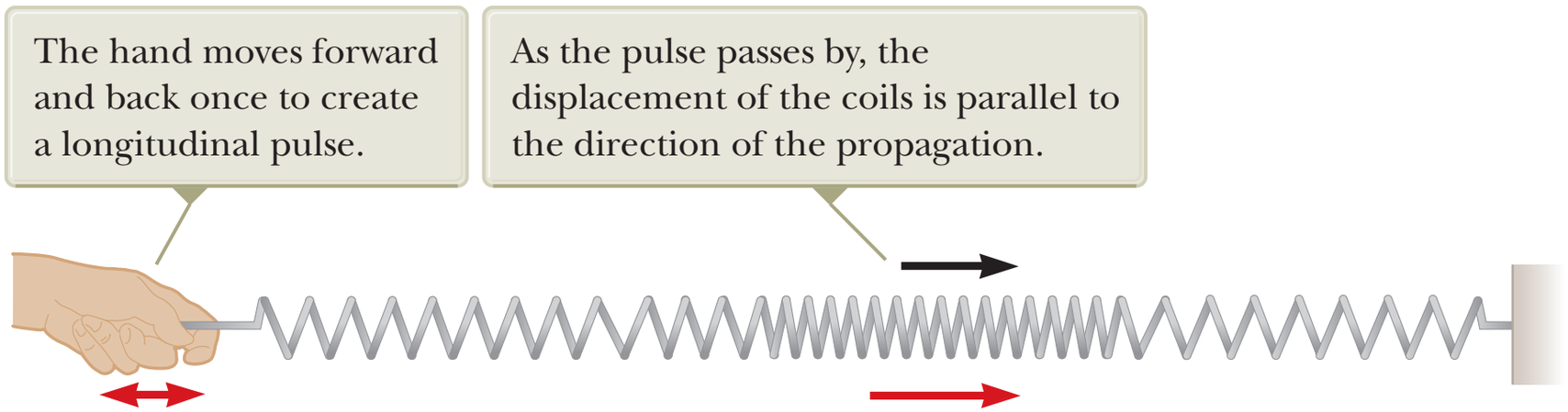
- คลื่น ในเส้นเชือก

คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)

อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างเช่น

- คลื่นเสียง
- คลื่น ในสปริง



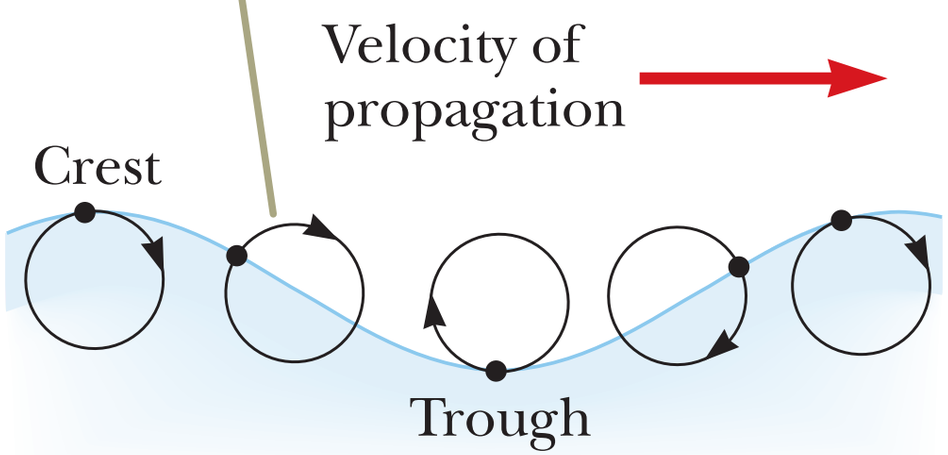


คลื่นที่ผิว (Surface waves)

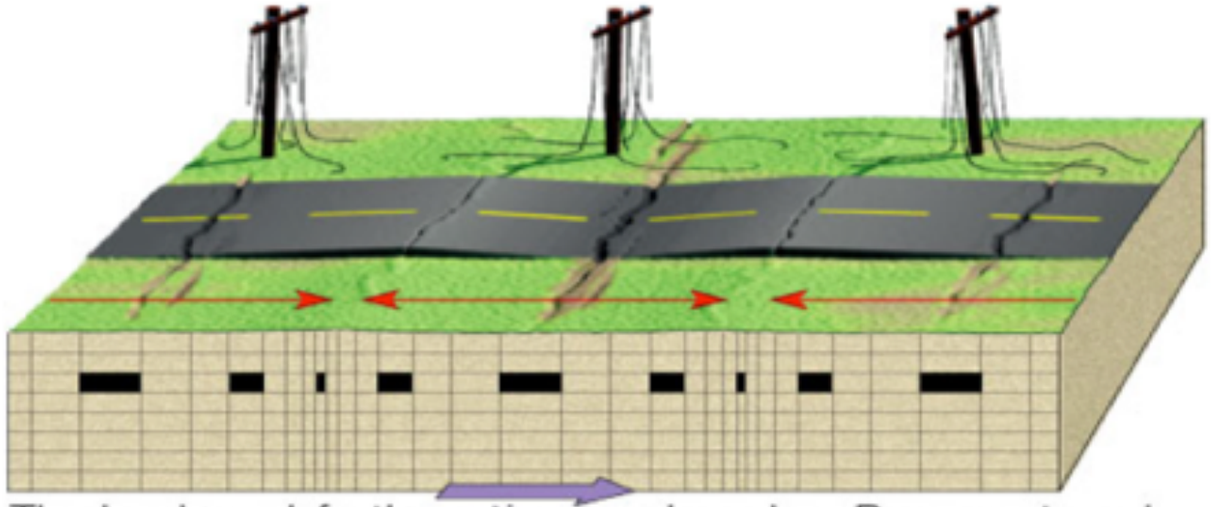
อนุภาคตัวกลางเคลื่อนที่ (หรือสั่น) ทั้ง 2 แนว

- คลื่นผิวน้ำ
- คลื่นแผ่นดินไหว

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

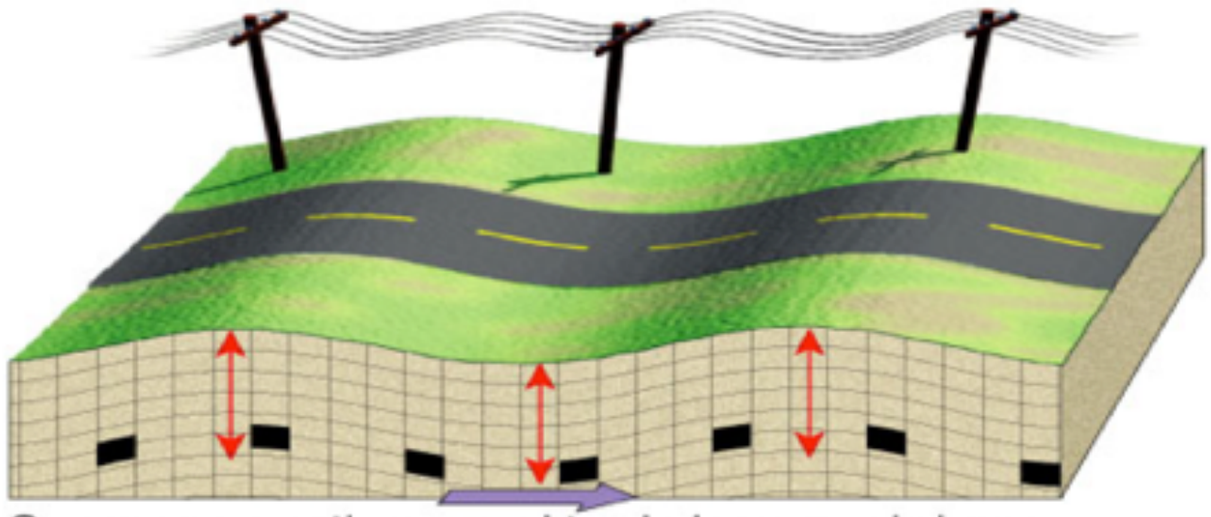


Primary waves



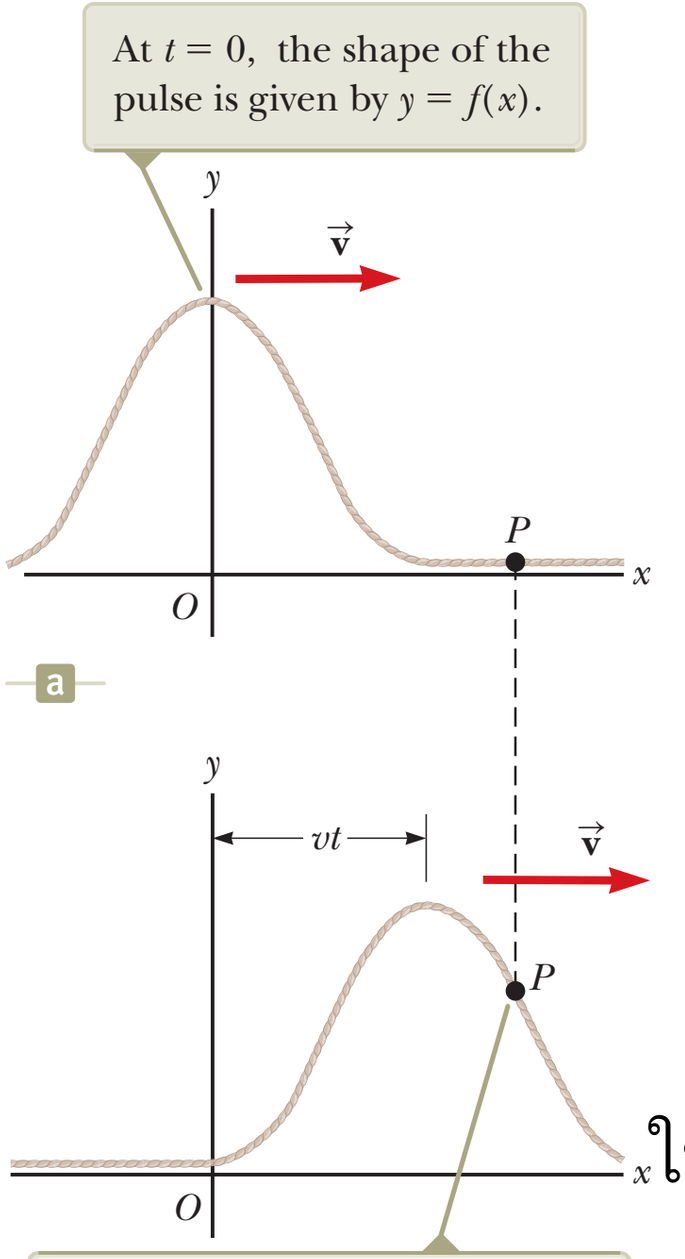
The back-and-forth motion produced as P waves travel along the surface can cause the ground to buckle and fracture.

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

$$t_1 = 0$$

$$x_1 = x_2 \pm vt_2$$

มองเข้าหาคลื่น

x ให้มีค่าคงที่ (เริ่มต้น)

คงที่

$x_1 = x_2 - vt$ → t เพิ่ม x_2 ต้องเพิ่ม → คลื่นไปทาง $+x$

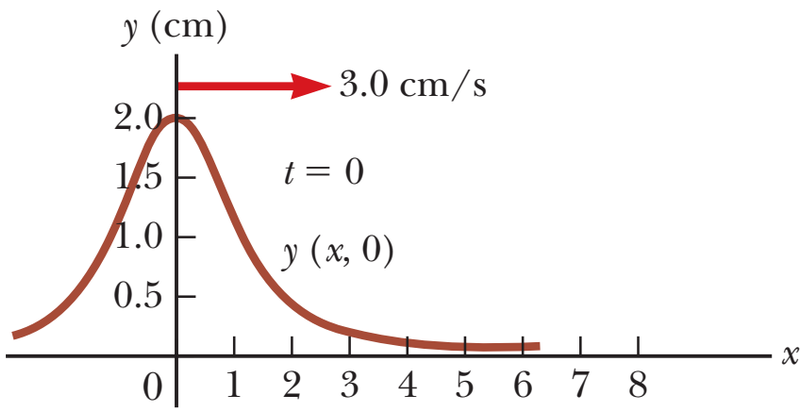
$x_1 = x_2 + vt$ → t เพิ่ม x_2 ต้องลด → คลื่นไปทาง $-x$

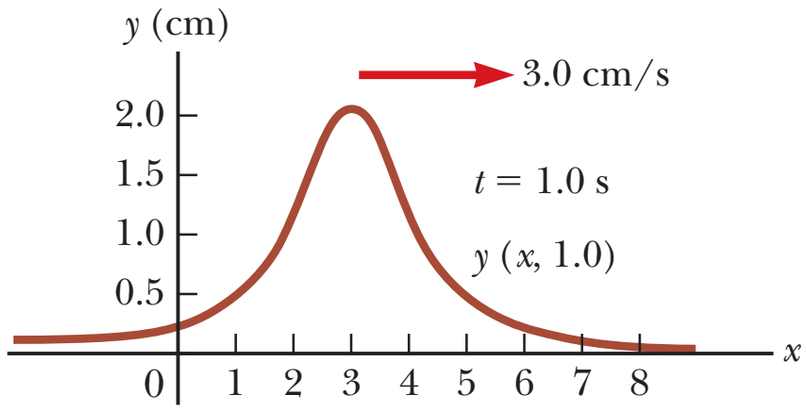
ตัวอย่าง - 1

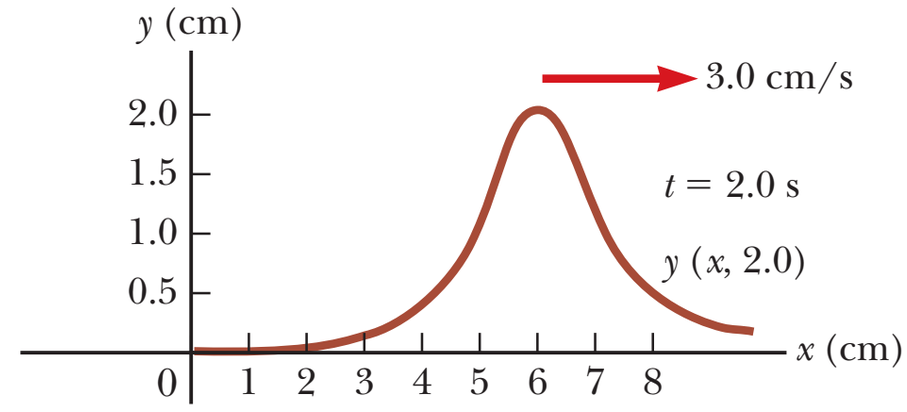
คลื่นลูกหนึ่งเคลื่อนที่ไปทางขวาตามแนวแกน x ด้วยฟังก์ชั่นคลื่น

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

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

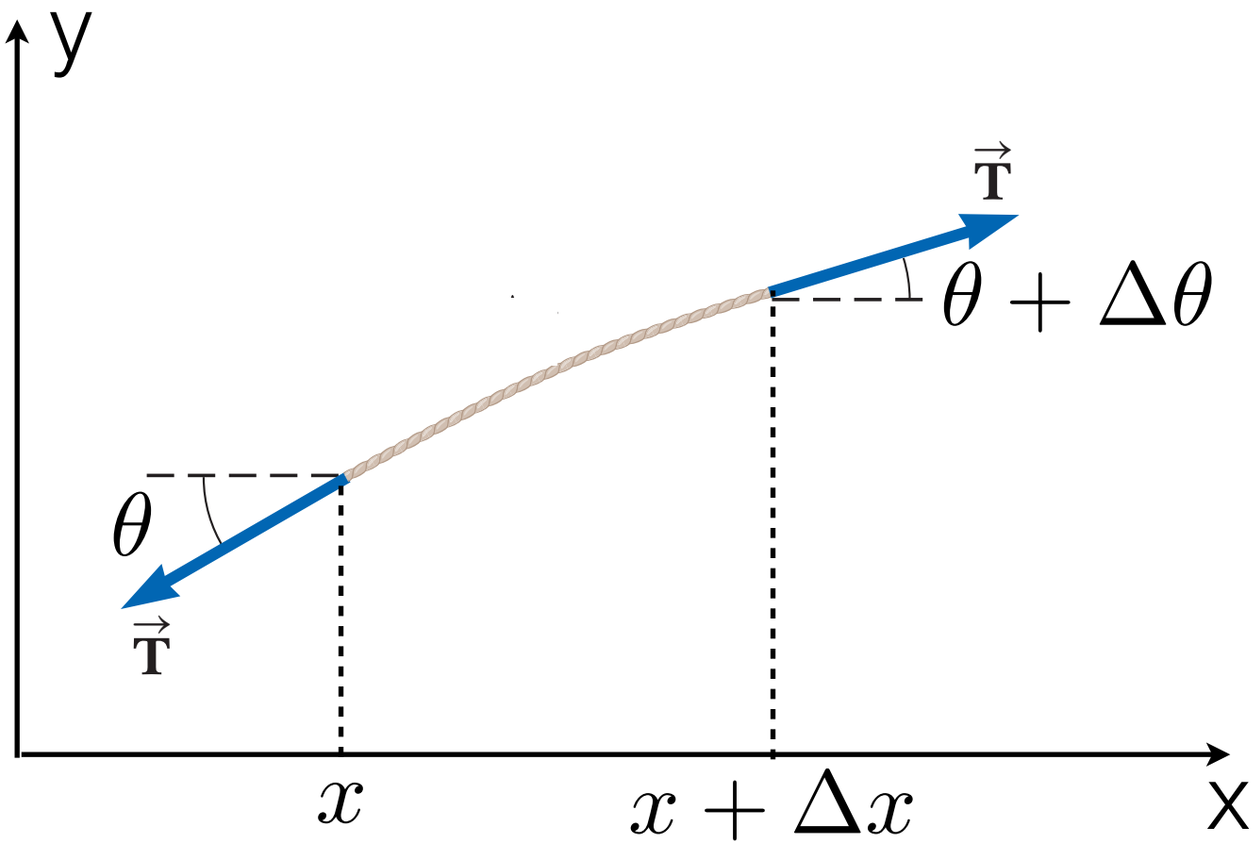






สมการคลื่น (Wave equation)

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

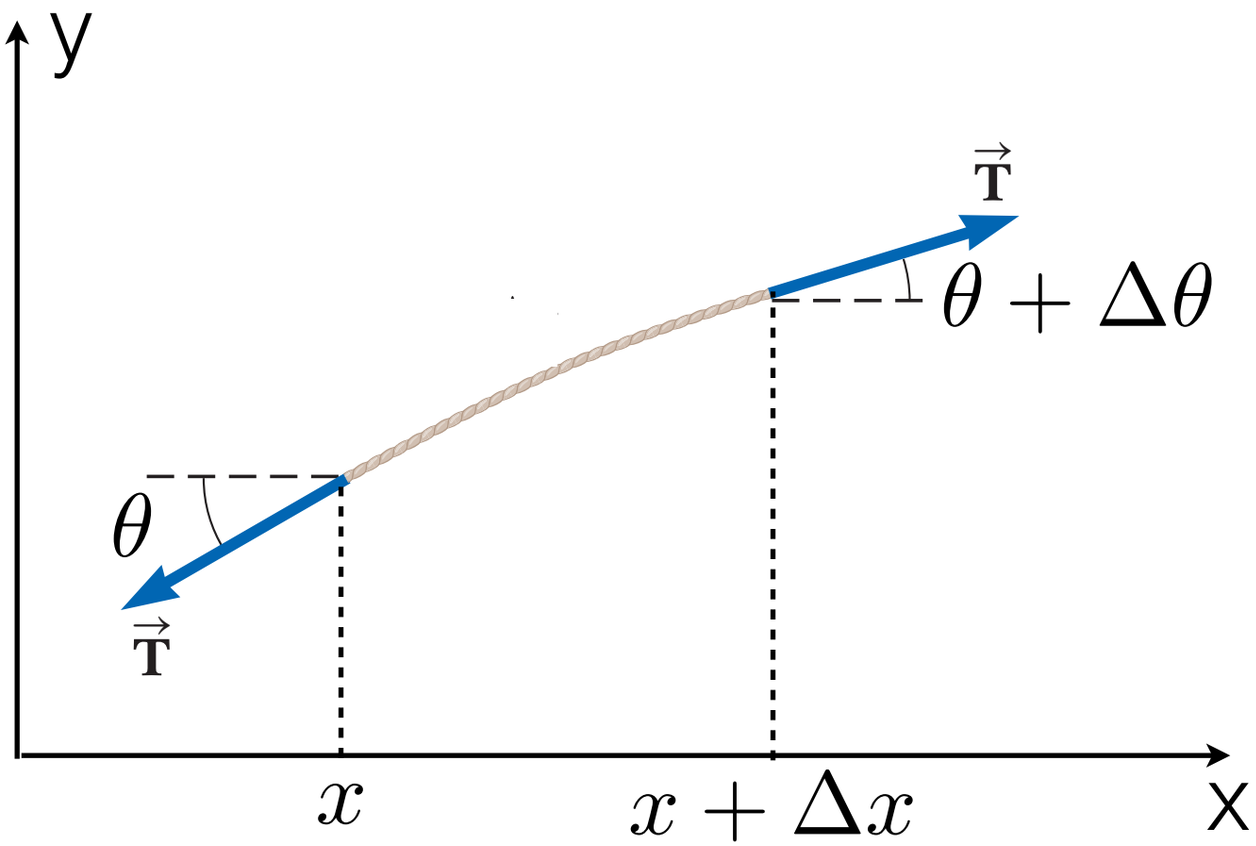
ทำ Derivative เทียบ x

พิจารณามุมเล็ก ๆ เทอมนี้ = 1

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

สมการคลื่น (Wave equation)

พิจารณาคลื่นในเส้นเชือก



แทนค่าไปในกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

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

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

y ควรอยู่ในรูปของ $f(x \pm Ct)$

C มีหน่วยเป็นความเร็ว [m/s]

เขียน C ด้วย $v = \sqrt{T/\mu}$

เราจะได้รูปทั่วไปของ**สมการคลื่น**

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

ตัวอย่าง - 2

จงแสดงว่าฟังก์ชั่นคลื่นต่อไปนี้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ของสมการคลื่น โดยที่ b เป็นค่าคงที่

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

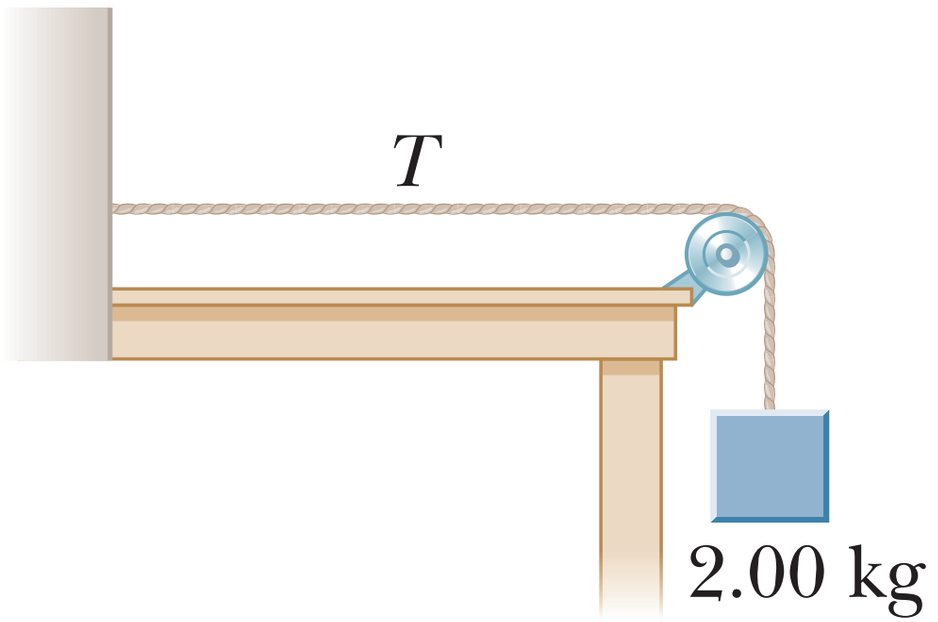
$$(\mathrm{b})\, y(x,t) = e^{b(x-vt)}$$

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

ตัวอย่าง - 2

ตัวอย่าง - 3

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

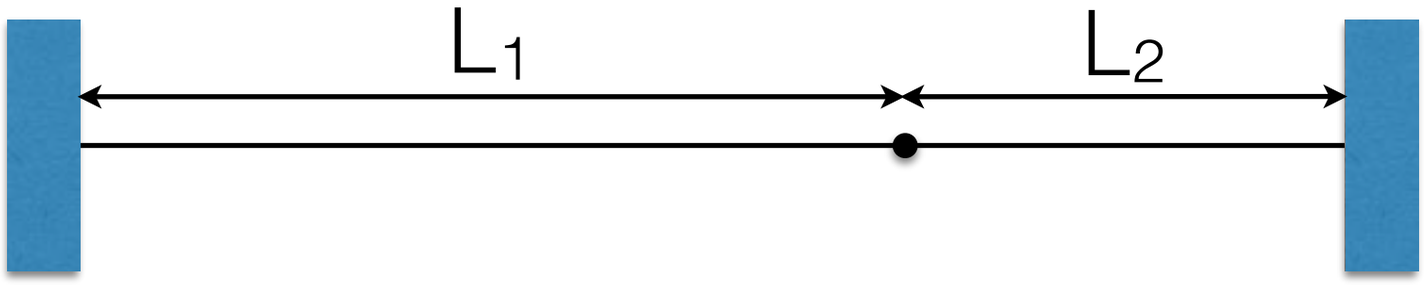


ตัวอย่าง - 4

จากรูป เชือกสองเส้นผูกปมเชื่อมเข้าด้วยกัน แล้วผูกปลายที่เหลือเข้ากับจุดตรึง กำหนด ให้มวลต่อหน่วยความยาวของเชือกทั้งสองเส้นเป็น

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

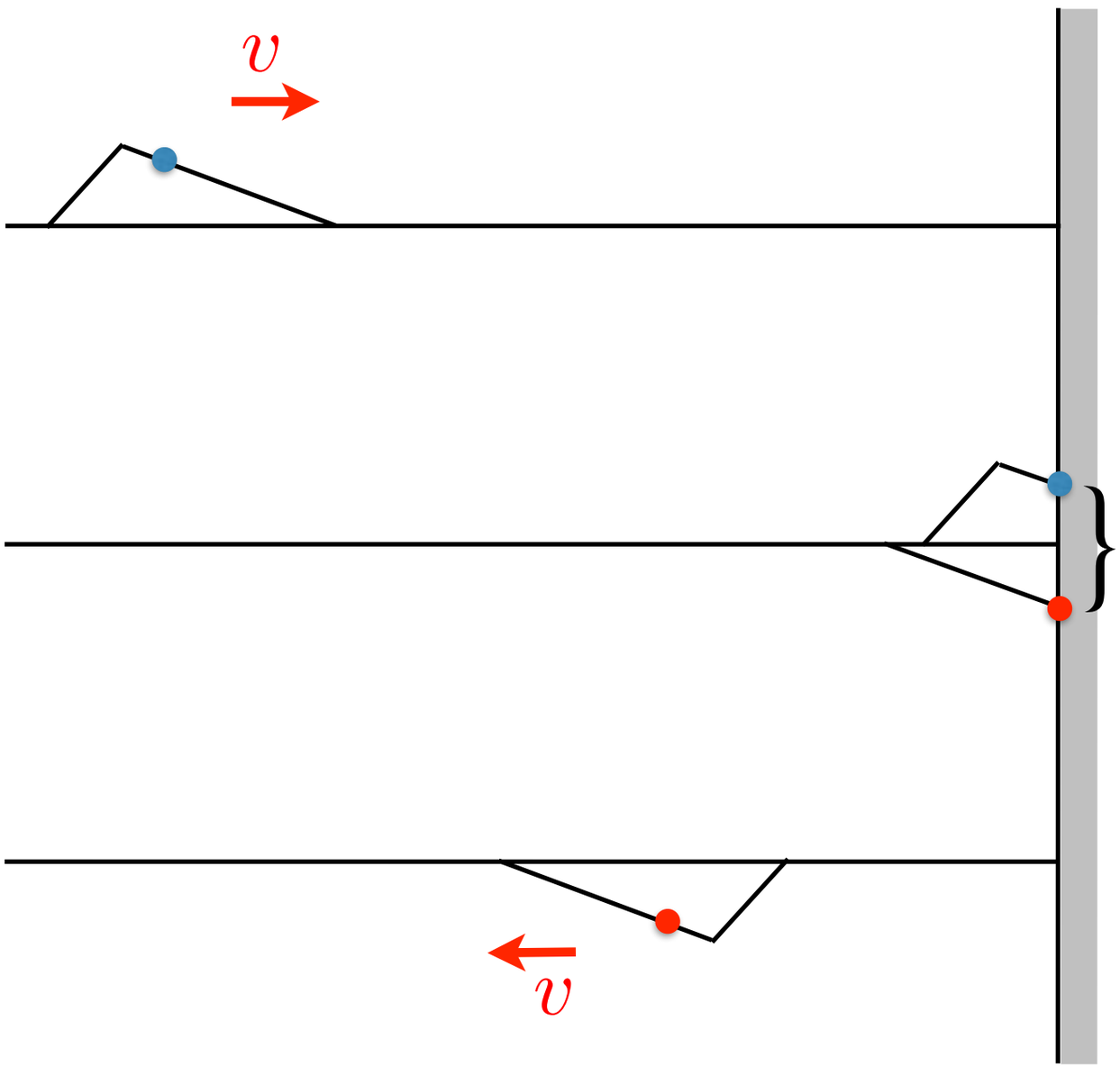
กำหนดความยาวของเชือกเส้นที่หนึ่งเป็น $L_1 = 3.0$ m และ ของเชือกเส้นที่สอง $L_2 = 2.0$ m และเชือกเส้นที่หนึ่งมีแรงตึงเท่ากับ 400 N ถ้ามีการส่งคลื่นดลจากจุดตรึงที่ปลายเชือกทั้งสองออกมากพร้อมกัน ให้มีทิศทางวิ่งเข้ามาหาปม คลื่นดลจากปลาย ใดจะถึงปมของเชือกก่อนกัน



ตัวอย่าง - 4

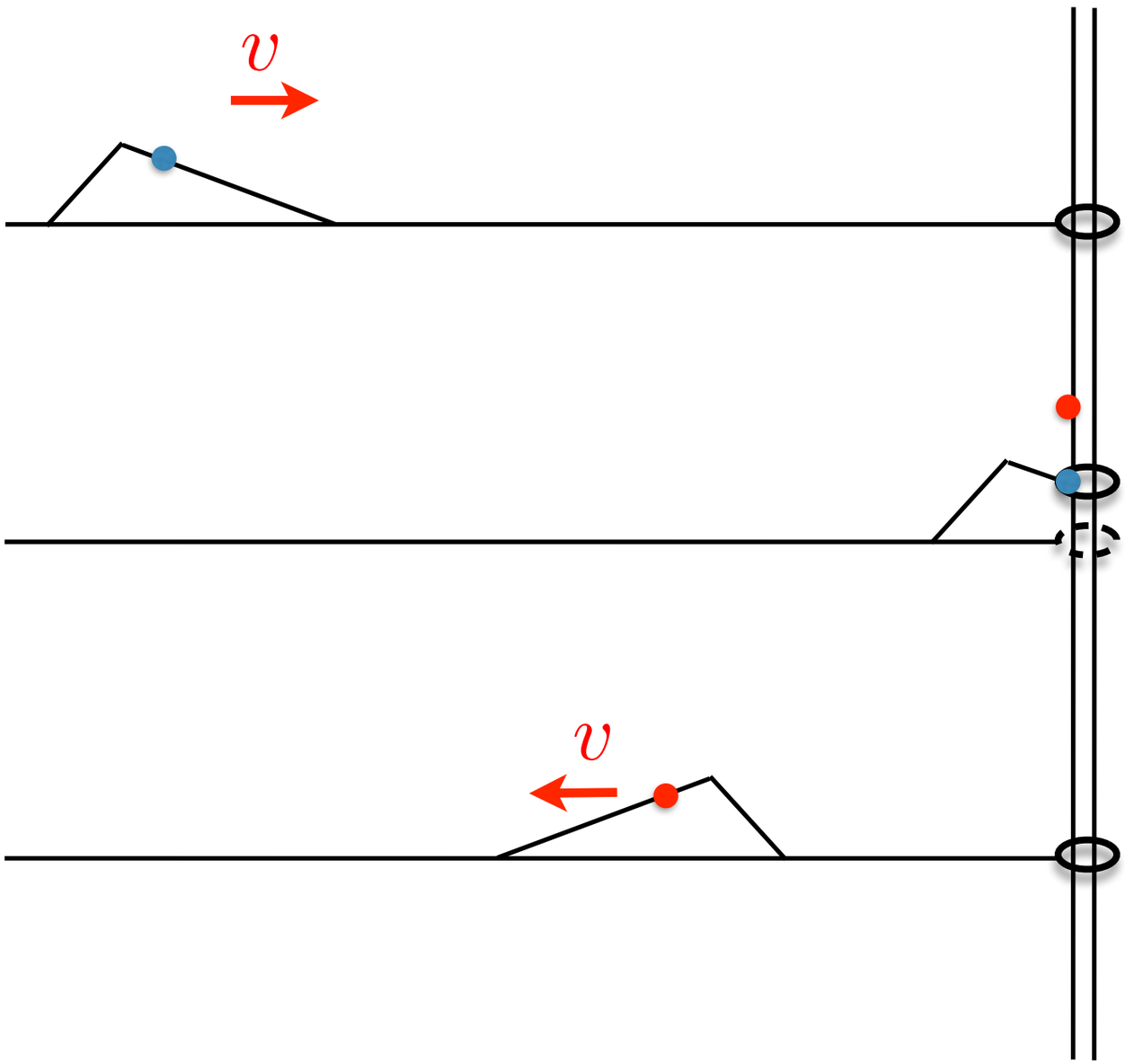
การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก (ปลายตรึง/ปิด)

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



“ในการสะท้อนปลายตรึง คลื่นสะท้อนมีการกลับด้าน (จากบนเป็นล่าง ตามรูป) แต่รูปร่างเหมือนเดิม”

การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก (ปลายอิสระ/เปิด)



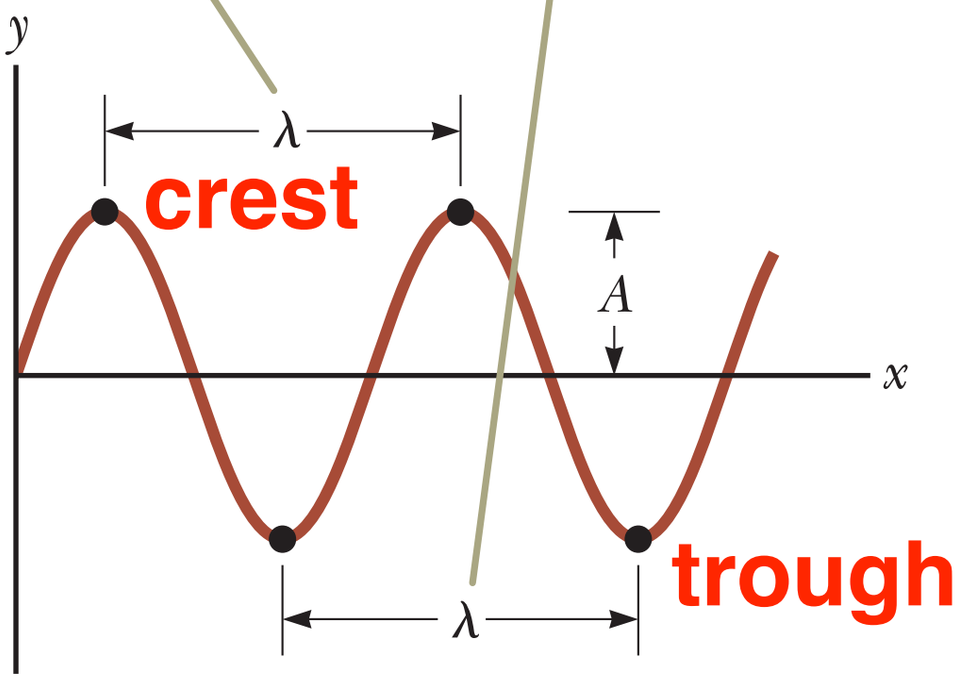
"ในการสะท้อนปลายอิสระ คลื่นสะท้อนจะวิ่งกลับด้านเดิม (ด้านบน ตามรูป) และรูปร่างเหมือนเดิม"

<u>พิเศษตรงบริเวณวงแหวนไร้มวล</u>

วงแหวนได้ผลจากคลื่นที่เข้ามาในขณะเดียวกันก็สร้างคลื่นที่มี Amplitude เดียวกันไปพร้อม ๆ กัน บริเวณนี้เราจะเห็นคลื่นมี Amplitude เป็น 2 เท่าของของเดิม

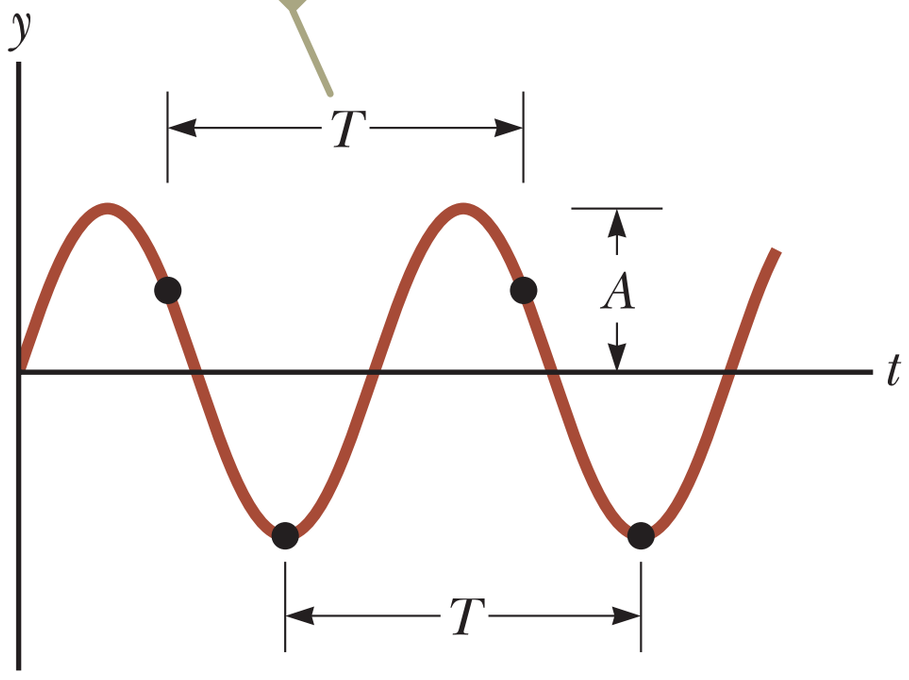
คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)

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



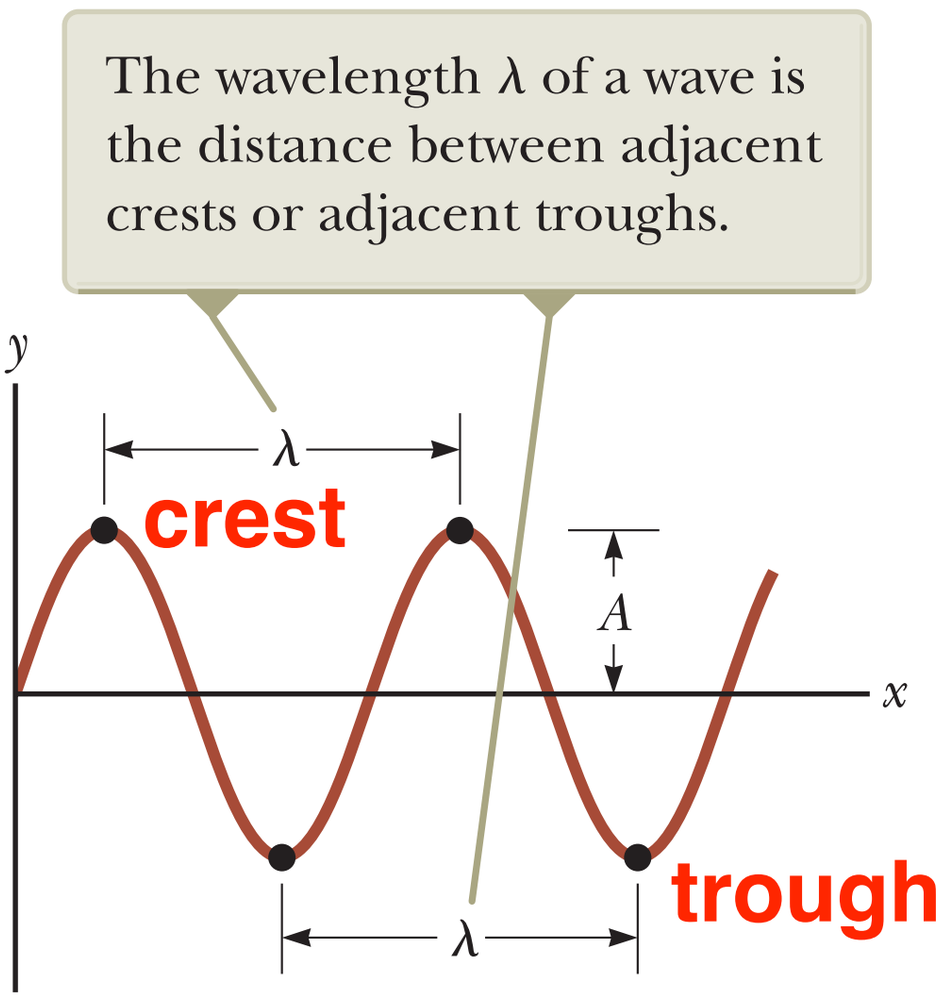
ตำแหน่งของกลุ่มของอนุภาค ในเวลาหนึ่ง ๆ

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)**

$x - vt$ คลื่นไปทางขวา **(+x)**

พิจารณาที่เวลา t = 0

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

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

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

สมการจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

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

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

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

เป็นหนึ่งในคำตอบได้

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

นิยาม

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

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

เขียนฟังก์ชั่นคลื่นใหม่ได้ว่า

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

phase

เขียนให้ทั่วไปมากขึ้น

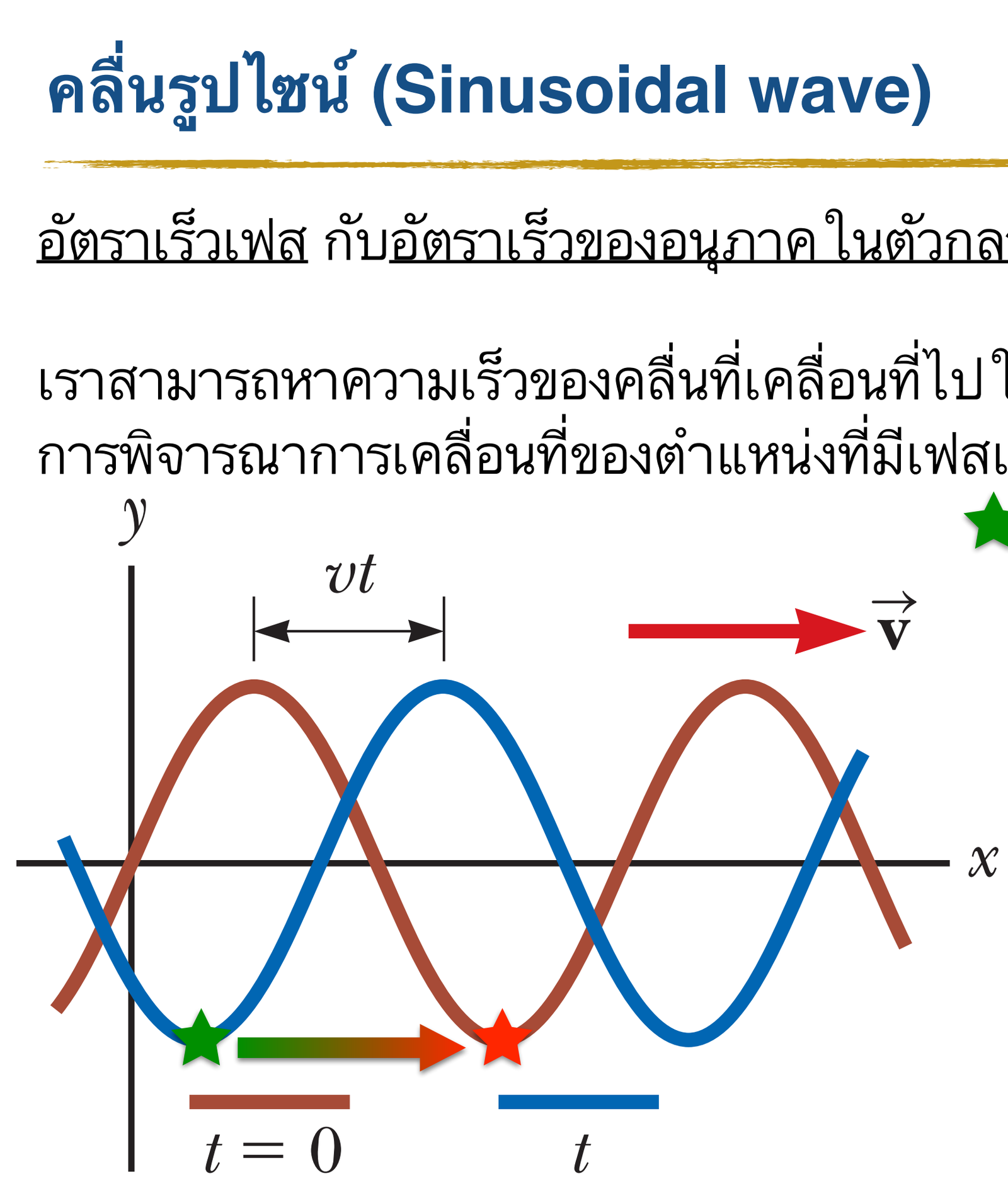
$$kx \pm \omega t + \phi$$

phase constant

Phase velocity
อัตราเร็วเฟส

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

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



อัตราเร็วเฟส กับอัตราเร็วของอนุภาค ในตัวกลาง**ไม่เหมือนกัน**

เราสามารถหาความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ไป ในตัวกลางได้โดย การพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งที่มีเฟสเท่ากัน

$$kx_0 = kx - \omega t$$

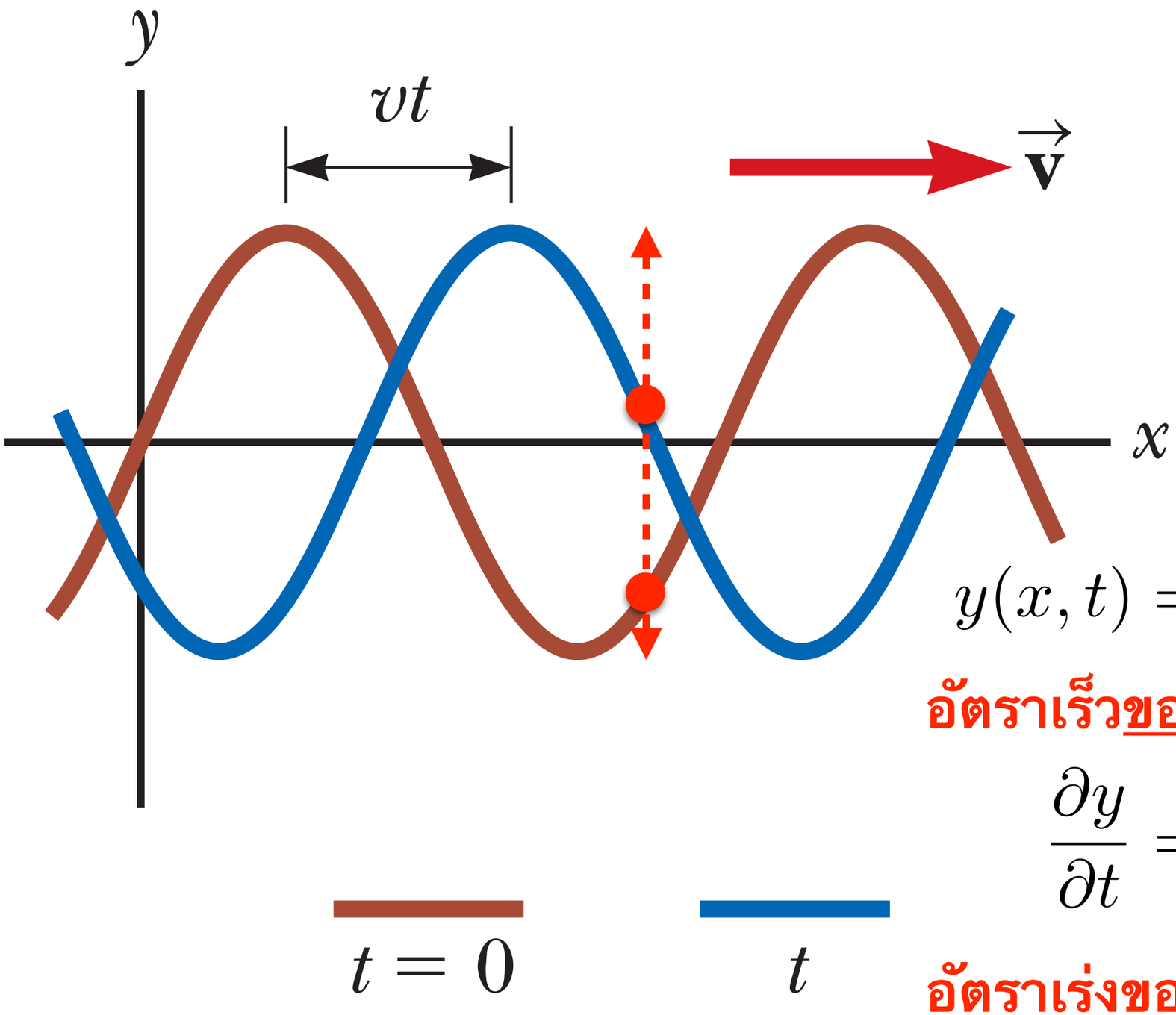
$$v = \frac{dx}{dt}$$

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

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

อัตราเร็วเฟส

คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



"คลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวา

แต่

ตัวกลางของคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็น SHM"

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

อัตราเร็วของการสั่นของอนุภาค ในตัวกลาง

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

อัตราเร่งของการสั่นของอนุภาค ในตัวกลาง

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

ตัวอย่าง - 5

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 - 5

ตัวอย่าง - 6

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 - 6

ตัวอย่าง - 7

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)

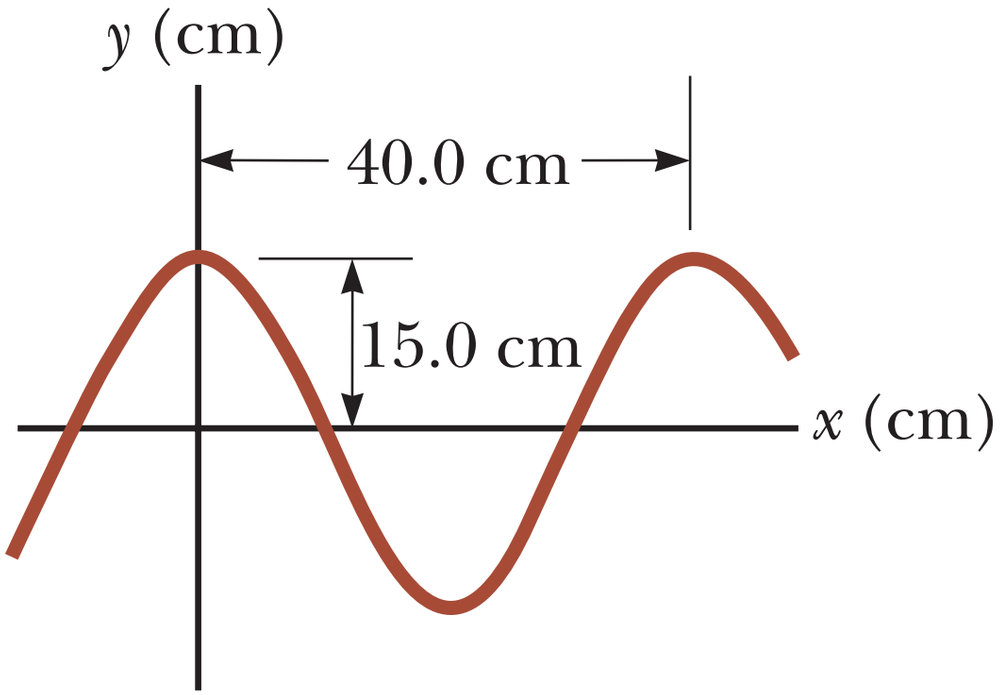
(2) คาบ

(3) ความถี่เชิงมุม

(4) อัตราเร็วเฟส

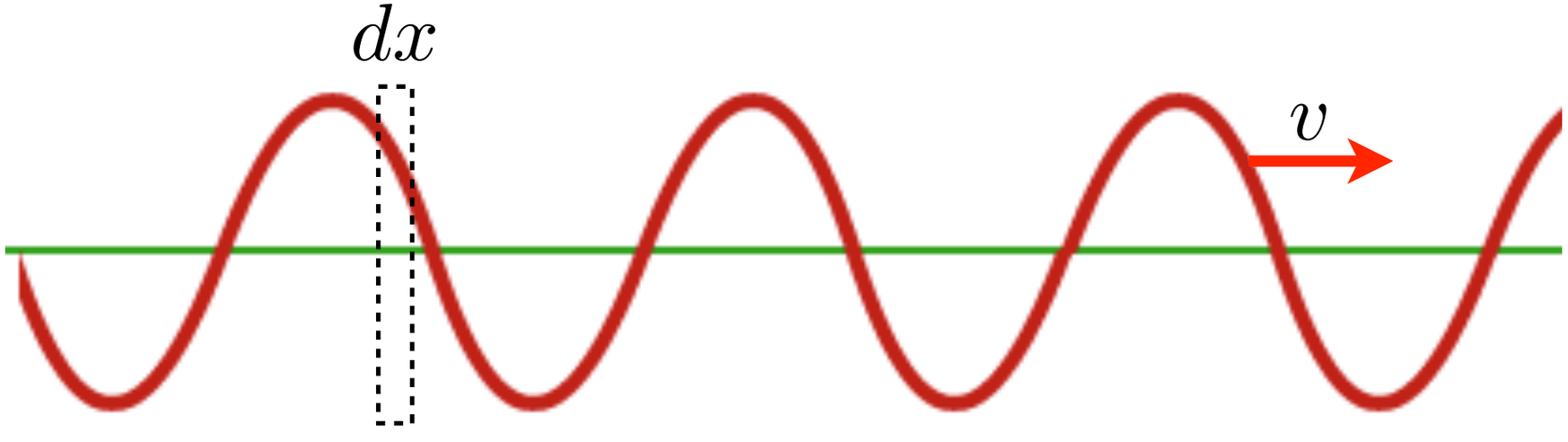
(5) ค่าคงที่ของเฟส (phase constant)

(6) ฟังก์ชั่นคลื่นของคลื่นนี้



ตัวอย่าง - 7

พลังงานจลน์ของคลื่นในเส้นเชือก



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

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

พิจารณาพลังงานจลน์ของก้อนมวล dm ที่แกว่งขึ้นลง

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

$$dm = \mu dx \qquad = \frac{\lambda}{2}$$

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

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

พลังงานจลน์ของคลื่น

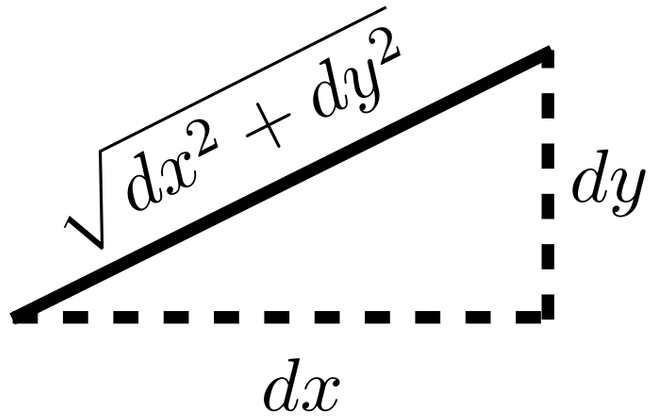
1 wavelength

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

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

พลังงานศักย์ของคลื่นในเส้นเชือก

พลังงานศักย์ขึ้นอยู่กับระยะยืดของเชือก จากรูปด้านขวา เชือกจะยืดออกจากระยะเดิมเท่ากับ $\sqrt{dx^2+dy^2}-dx$



$$\sqrt{dx^2+dy^2}-dx = dx\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}-dx$$

$$\approx dx\left(1+\frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)-dx$$

$$\approx \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx$$

พลังงานศักย์หาได้จาก

$$dU = T\cdot\frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx$$

แทนค่า

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

และอินทิเกรต 0 ถึง λ

พลังงานศักย์ของคลื่น 1 wavelength

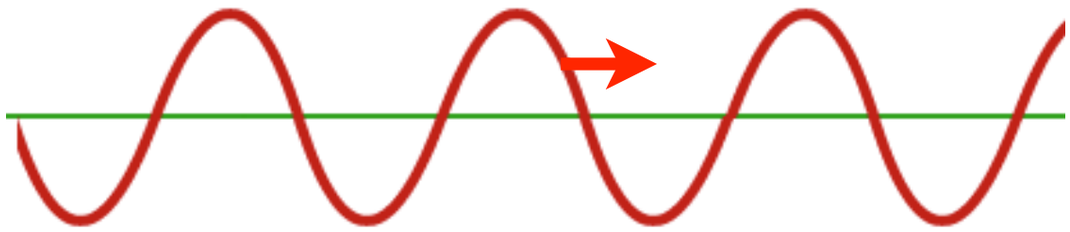
$$U = \frac{A^2\pi^2 T}{\lambda}$$

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

เท่ากับพลังงานจลน์ของคลื่น 1 wavelength

พลังงานของคลื่นในเส้นเชือก

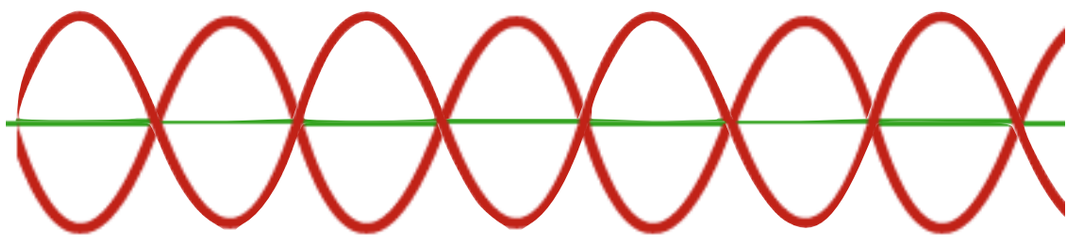
คลื่นที่เคลื่อนที่ไป
Traveling wave



พิจารณาพลังงาน ณ ขณะหนึ่ง ๆ

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_k + U \\ &= \frac{2A^2\pi^2 T}{\lambda} \\ &= \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda \end{aligned}$$

คลื่นสถิต
Standing wave



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

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

อัตราการส่งผ่านพลังงานของคลื่นในเส้นเชือก

กำลังเฉลี่ย หรืออัตราการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ย (ทั้งพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์)

$$
\left.
\begin{aligned}
P = \frac{E}{t} &= \frac{2A^2\pi^2 T}{\lambda}(\frac{v}{\lambda}) \\
&= \frac{2A^2\pi^2 T v}{\lambda^2} \\
P = \frac{E}{t} &= \frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda(\frac{v}{\lambda}) \\
&= \frac{1}{2}\mu v\omega^2 A^2
\end{aligned}
\right\} \text{มีค่าเท่ากัน}
$$

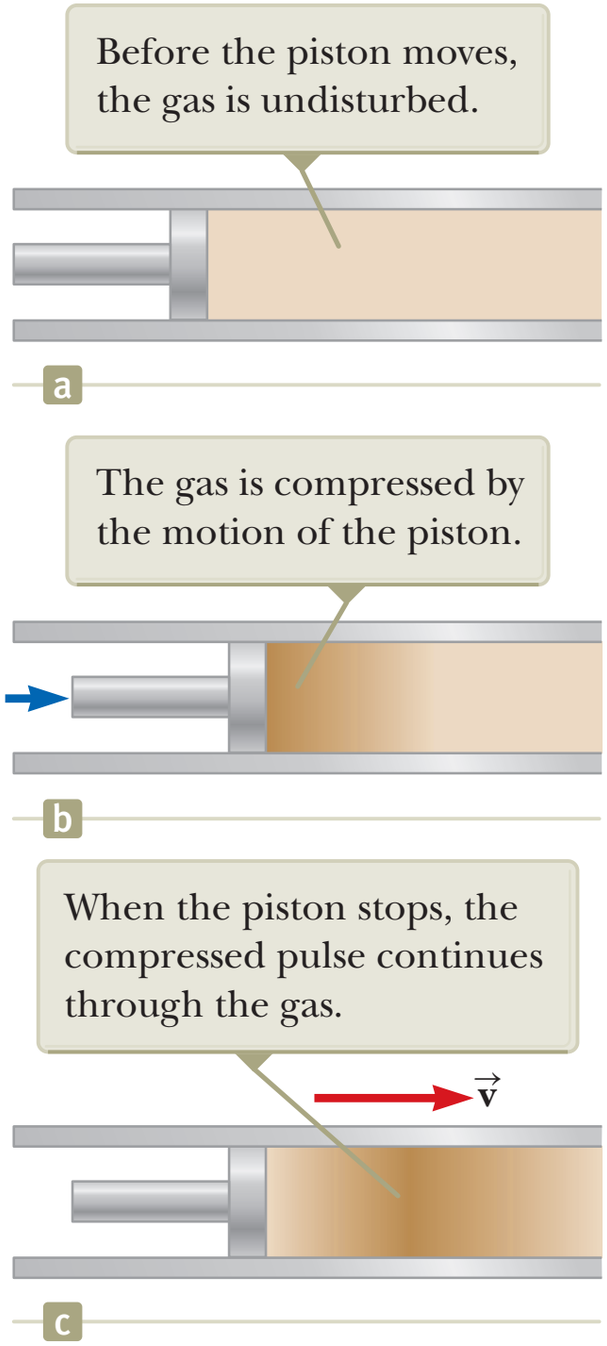
ตัวอย่าง - 8

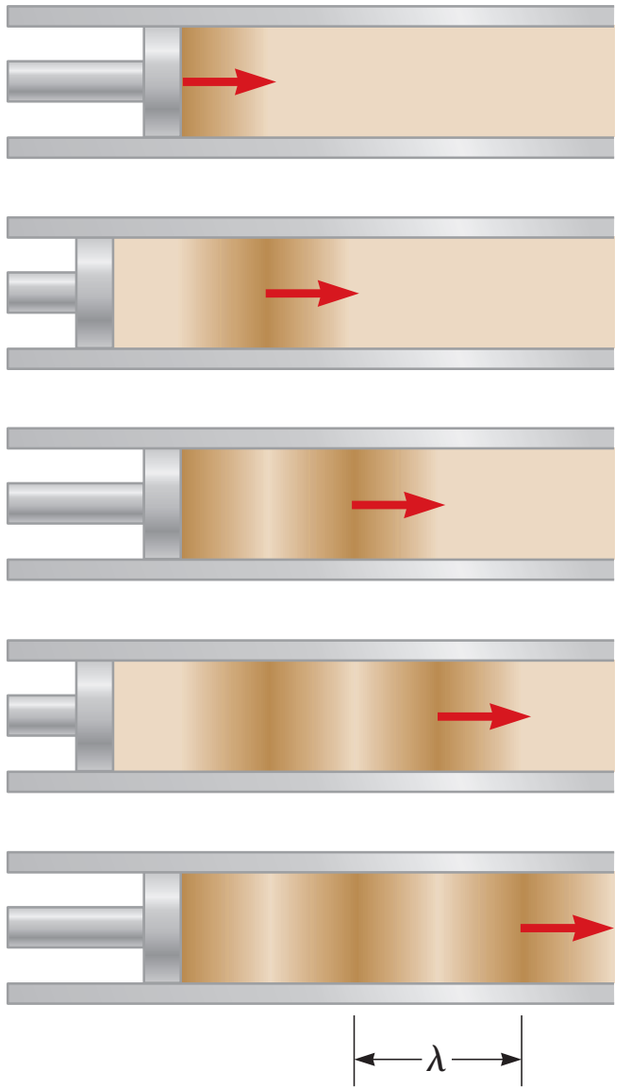
ลวดเส้นหนึ่งมีมวลต่อหน่วยความยาว 525 g/m มีความตึง 45N ถ้าปล่อยคลื่นที่มีความถี่ 120 Hz และมีอำพน 8.5 mm ให้เคลื่อนที่บนเส้นลวด คลื่นจะส่งผ่านพลังงานด้วยอัตราเท่าไหร่

ตัวอย่าง - 9

จงพิสูจน์กฎการอนุรักษ์พลังงาน ในกรณีที่คลื่นสองขบวนวิ่งสวนทางกัน แล้วเกิดเป็นคลื่นสถิต

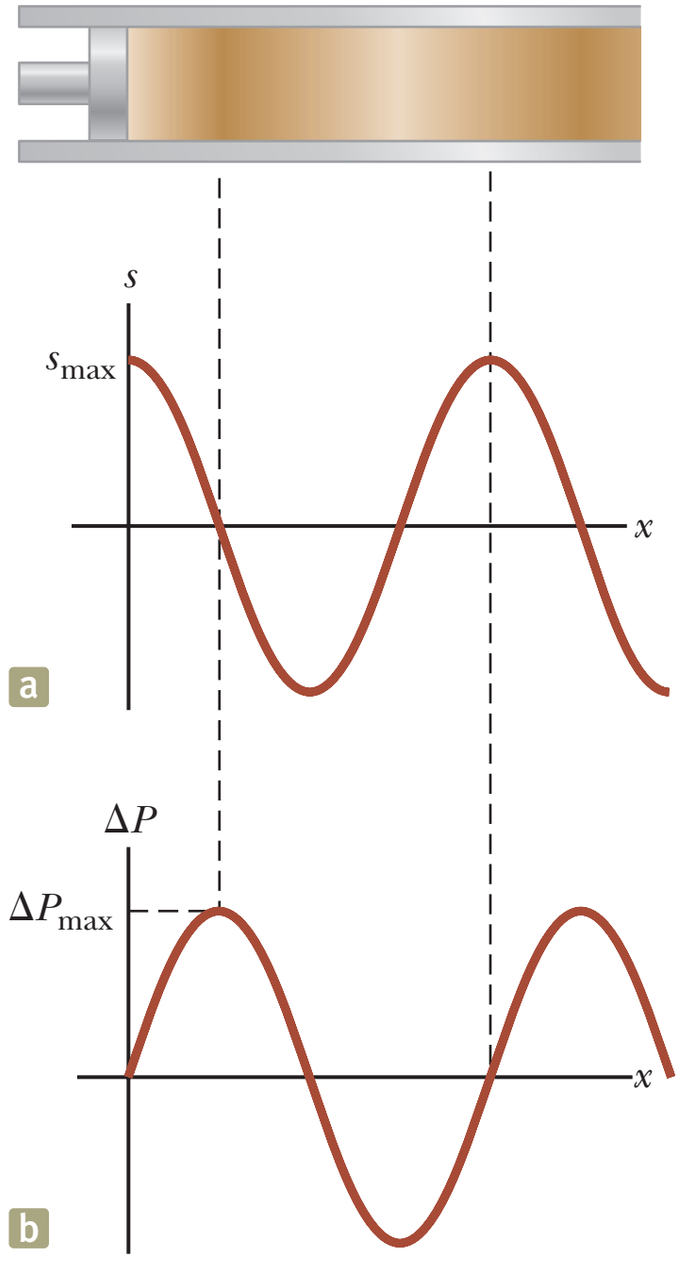
คลื่นเสียง



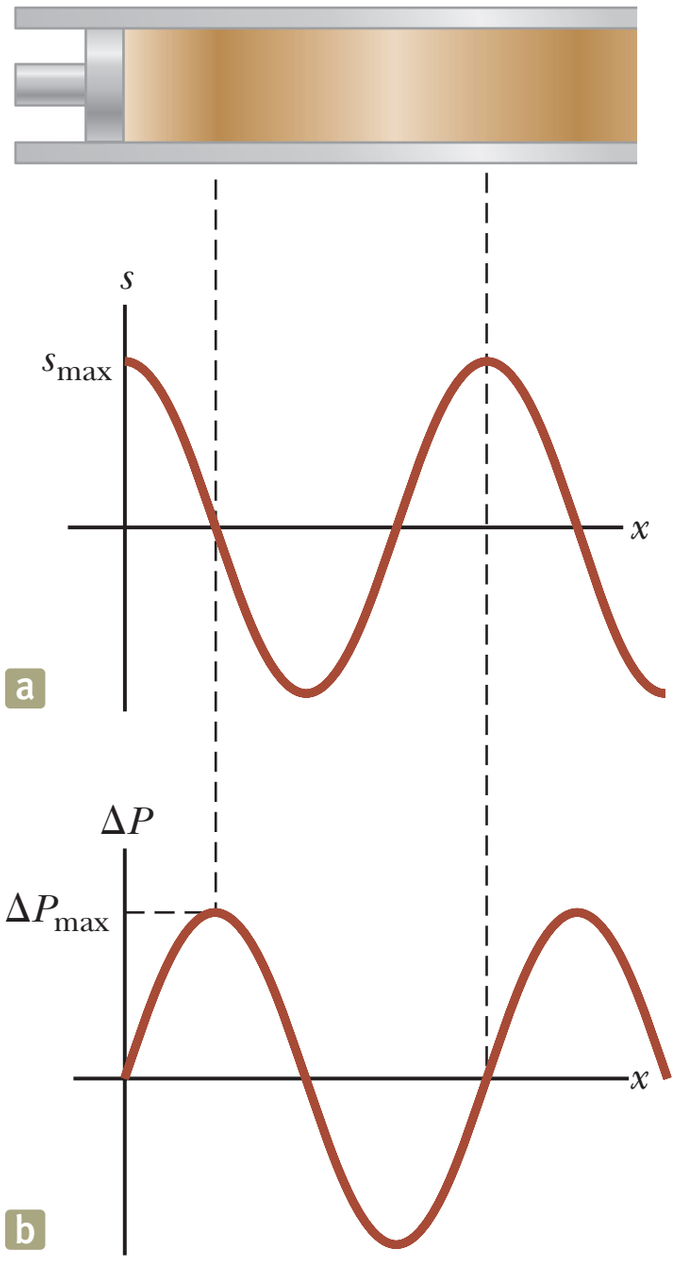


การกระจัดสูง ความดันต่ำ

การกระจัดต่ำ ความดันสูง



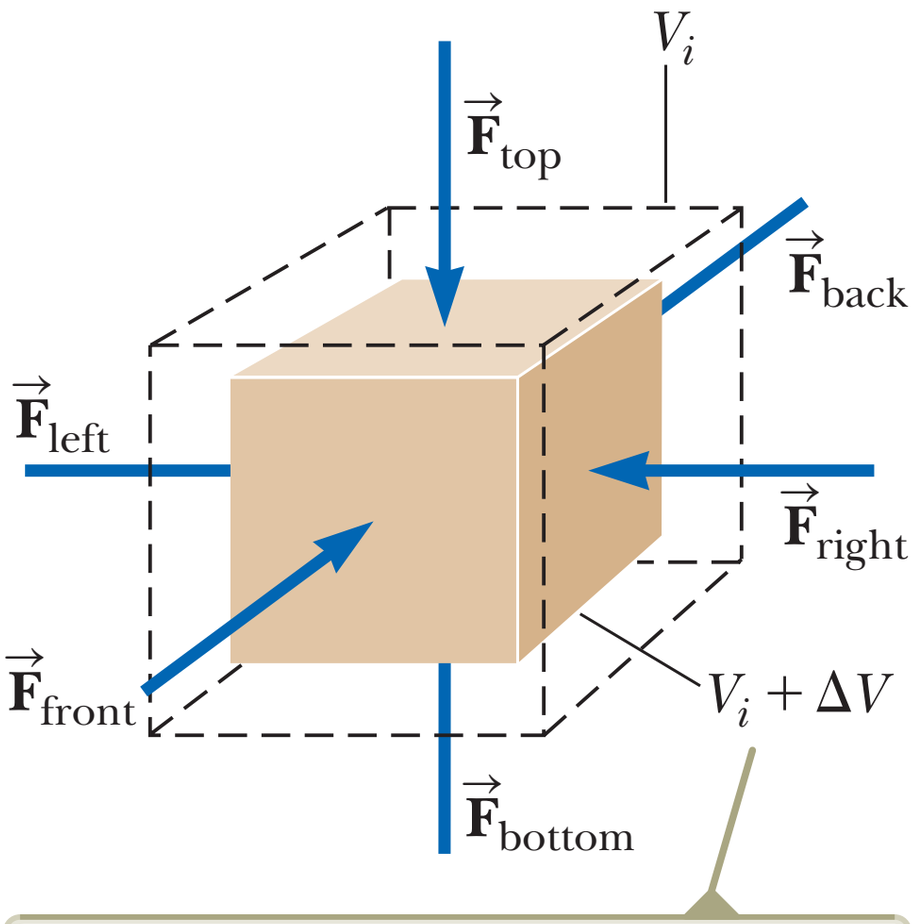
คลื่นเสียง



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

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

Bulk Modulus



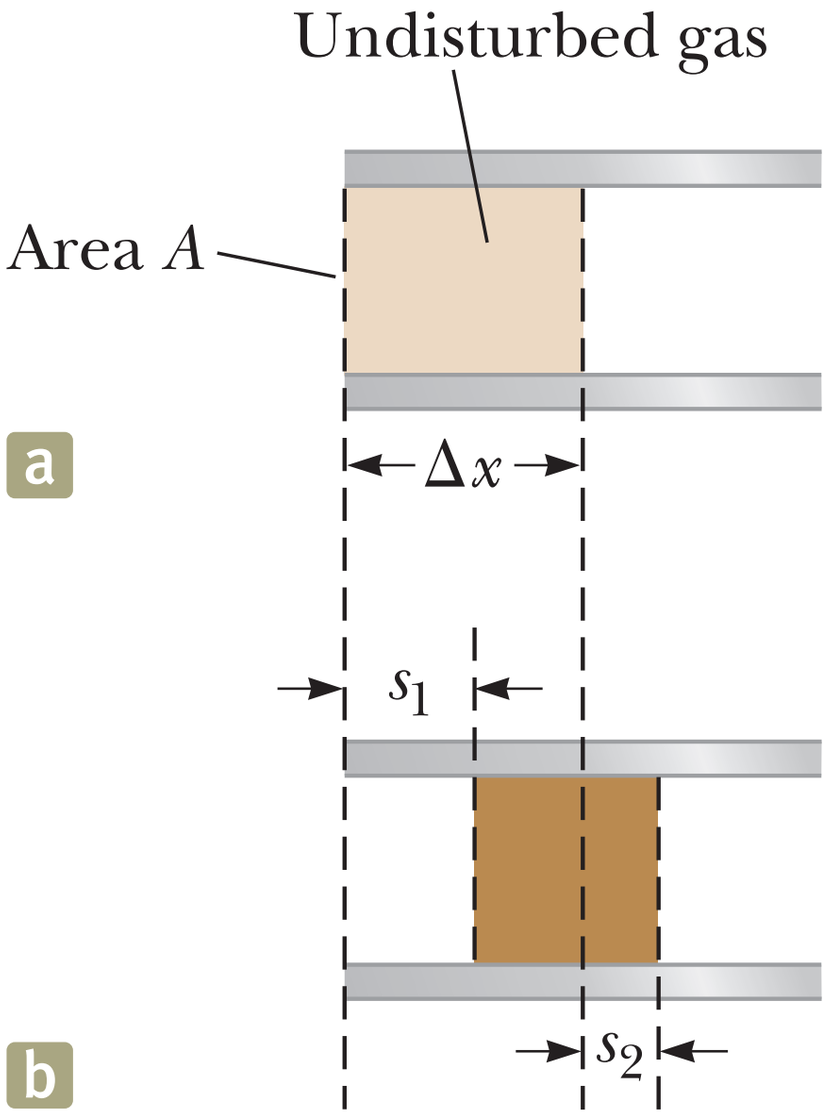
The cube undergoes a change in volume but no change in shape.

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



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

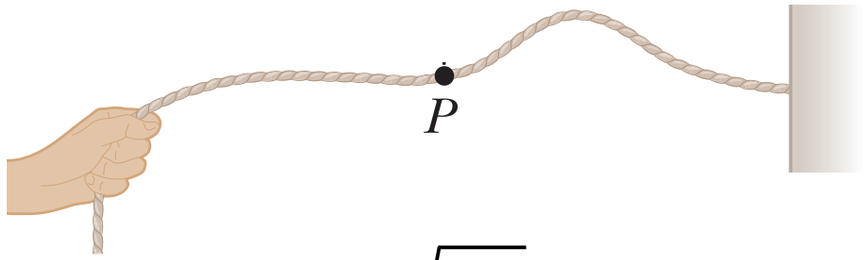
$$= -B\frac{A\Delta s}{A\Delta x}$$

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

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

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 - 10

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

(1) จงหาระดับเสียงที่คนทำงานจะได้ยินเมื่อเครื่องจักรเครื่องที่หนึ่งทำงาน

(2) จงหาระดับเสียงที่คนทำงานจะได้ยินเมื่อเครื่องจักรทั้งสองเครื่องทำงาน

ดอปเปลอร์ (Doppler)

เมื่อต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นที่มีความถี่ต่างไปจากการการที่ต้นกำเนิดเสียงและผู้สังเกตอยู่นิ่ง

v = ความเร็วเสียง

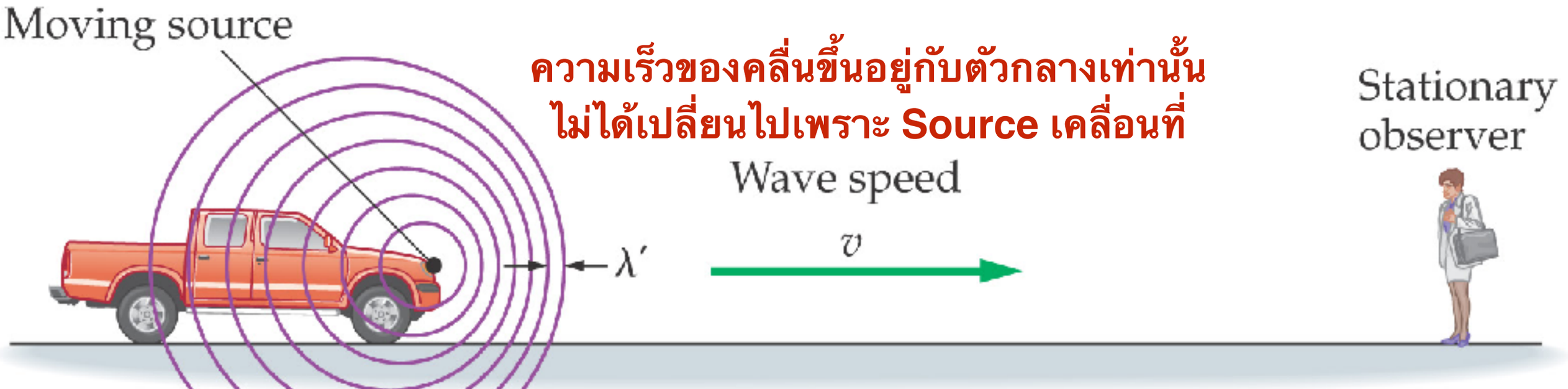
v_o = ความเร็วของผู้สังเกต

v_s = ความเร็วของแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดเสียงอยู่นิ่ง

ผู้สังเกตุอยู่นิ่ง **แหล่งกำเนิดเสียงเคลื่อนที่** **ผู้สังเกตุเคลื่อนที่**

Doppler: Source is moving



ความเร็วของคลื่นขึ้นอยู่กับตัวกลางเท่านั้น
ไม่ได้เปลี่ยนไปเพราะ Source เคลื่อนที่

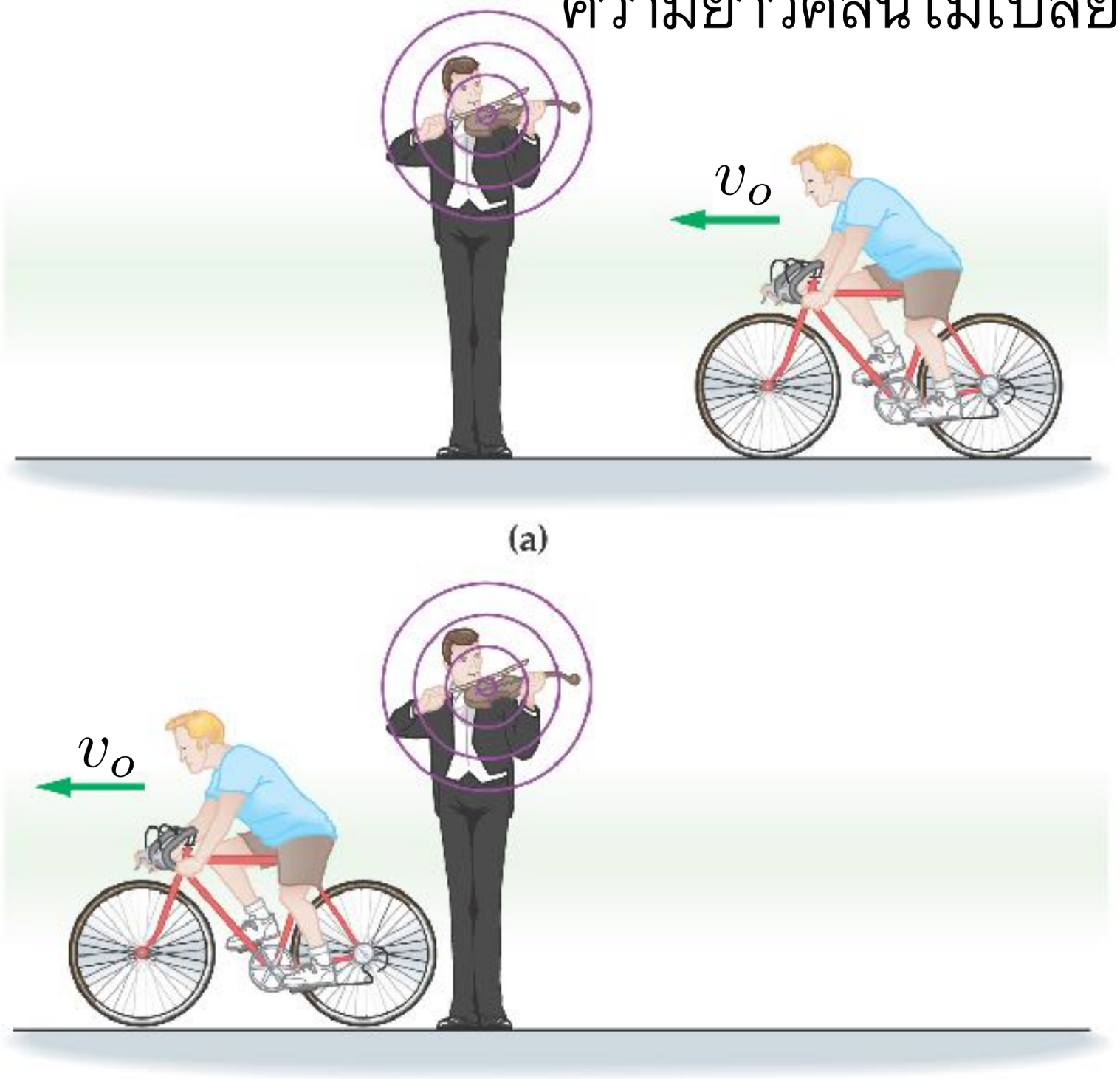
$$\lambda' = \lambda \mp v_s T$$
$$= \lambda \mp \frac{v_s}{f}$$

- คือ Source วิ่งเข้าหาเรา
+ คือ Source วิ่งออกจากเรา

$$f' = \frac{v}{\lambda'}$$
$$= \frac{v}{\lambda \mp \frac{v_s}{f}}$$
$$= f\frac{v}{\lambda f \mp v_s}$$
$$= f\frac{1}{1 \mp \frac{v_s}{v}}$$

Doppler: Observer is moving

ความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง



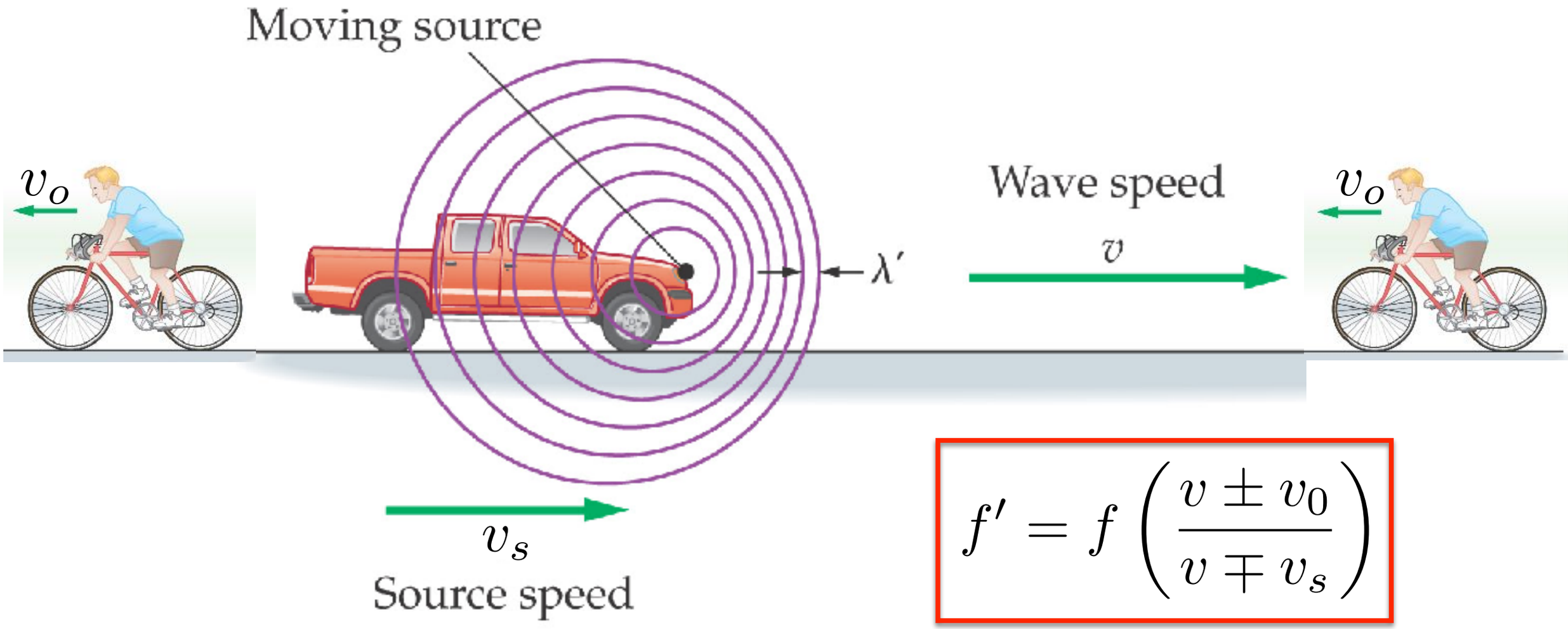
+ คือเราวิ่งเข้าหา Source
- คือเราวิ่งออกจาก Source

$$f' = \frac{v \pm v_0}{\lambda}$$

$$= f\frac{v \pm v_0}{v}$$

$$= f(1 \pm \frac{v_0}{v})$$

Doppler: General case



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

ดูสถานการณ์ให้ดี อะไรวิ่งยังไง
ใช้ Common sense
เวลา Source วิ่ง ความถี่ที่เข้าหาเราเป็นอย่างไร
เวลาเราวิ่งเข้าหา Source ความถี่จะเป็นอย่างไร

- $-v_S$ คือ Source วิ่งเข้าหาเรา
- $+v_S$ คือ Source วิ่งออกจากเรา
- $+v_O$ คือเราวิ่งเข้าหา Source
- $-v_O$ คือเราวิ่งออกจาก Source

ตัวอย่าง - 11

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

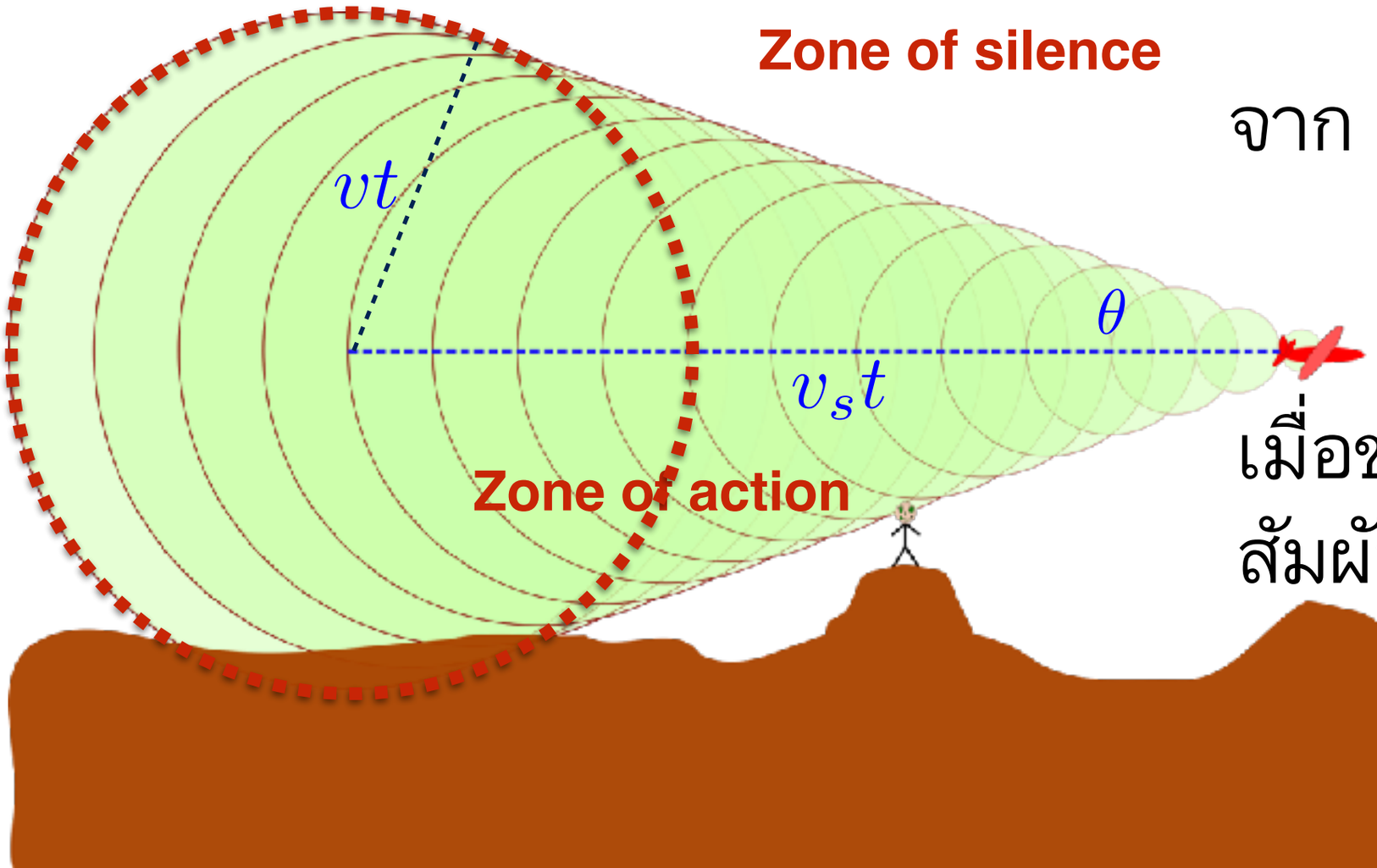
(2) หากทั้งสองกลุ่มคลาดกัน และว่ายออกห่างจากกัน ความถี่ของคลื่นโซน่าร์ที่กลุ่ม ข จะรับได้มีค่าเท่า ใด

Supersonic speed

สูตรของ Doppler จะไม่สามารถใช้ได้เมื่อ vo,vs เคลื่อนที่เร็วกว่าคลื่น

- พิจารณาเมื่อ Observer เคลื่อนที่เร็วกว่าเสียง
- พิจารณาเมื่อ Source เคลื่อนที่เร็วกว่าเสียง → Supersonic

Mach number $M \equiv \dfrac{v_s}{v}$

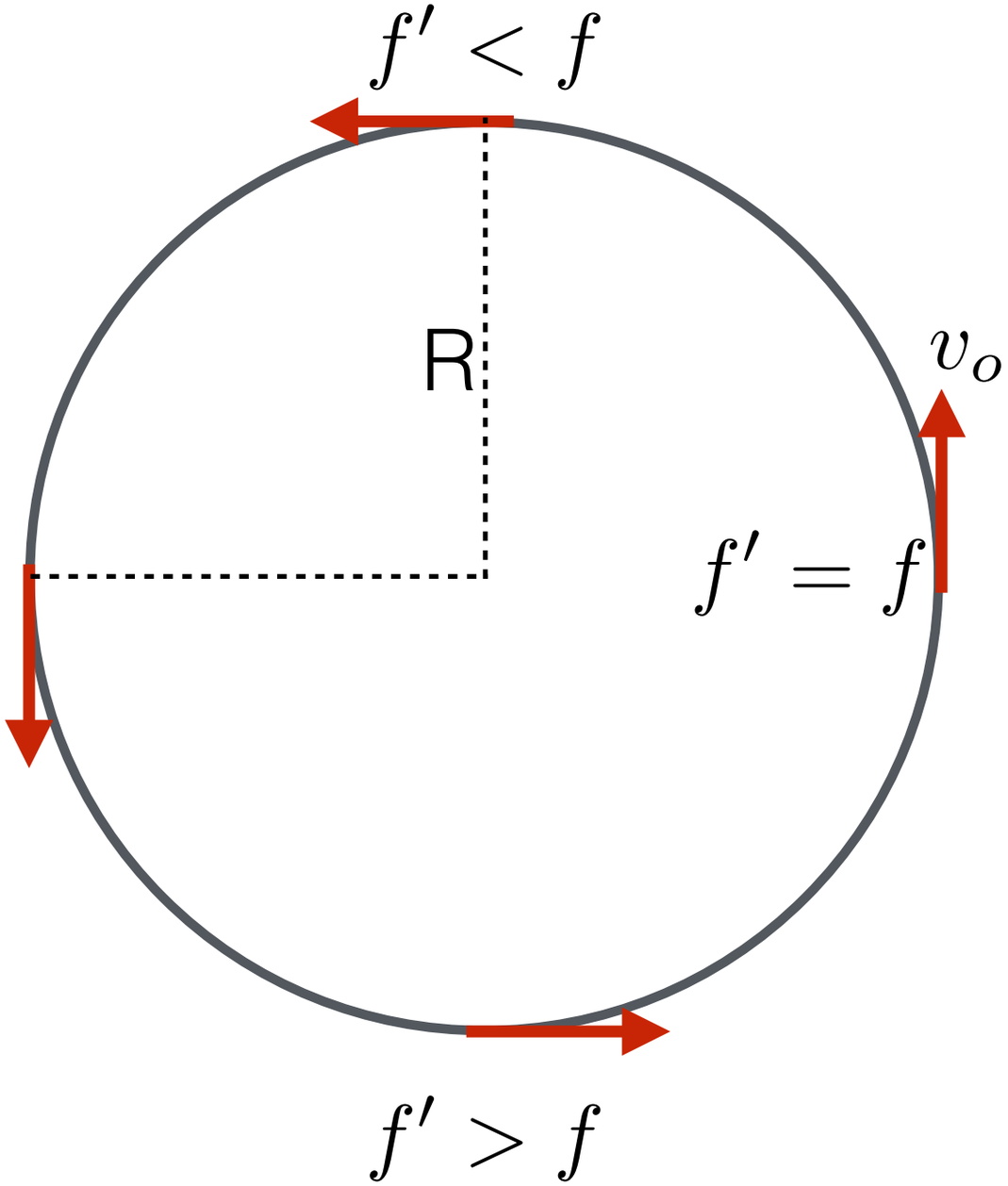


จาก Mach cone

$$\sin\theta = \frac{vt}{v_s t} = \frac{1}{M}$$

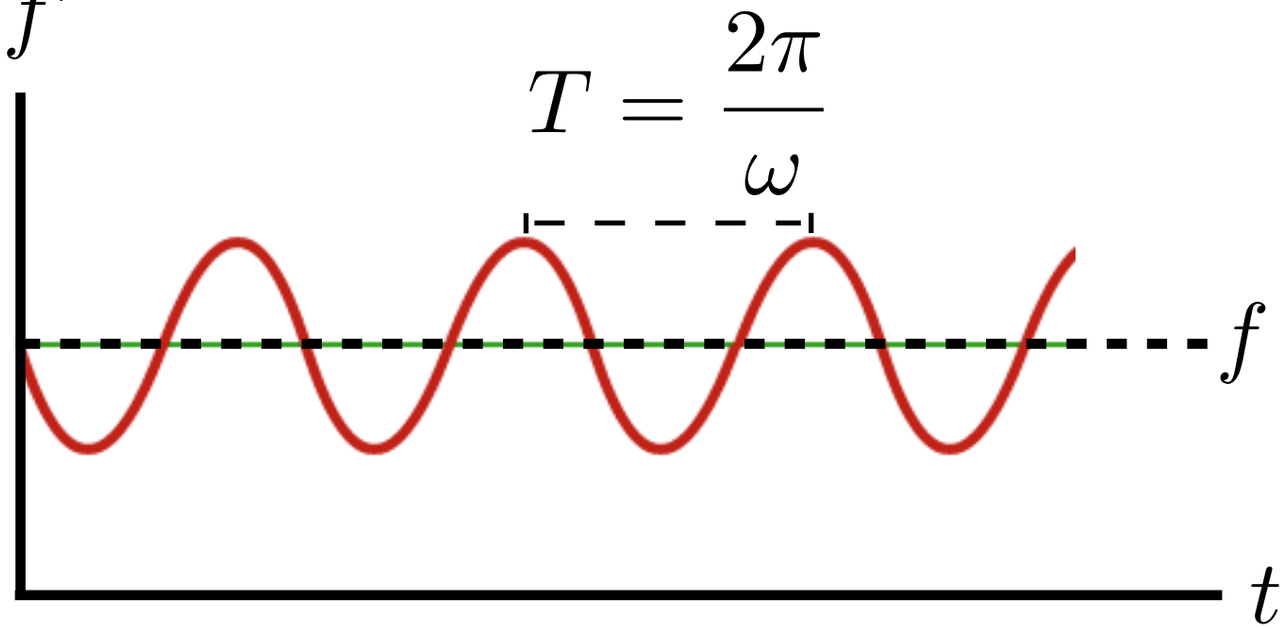
เมื่อขอบของ Mach cone สัมผัสกับพื้นผิว→Sonic boom

More on doppler



พิจารณาเมื่อ Source เคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็วเชิงมุม ω คงที่

- Observer ทำการบันทึกเสียงที่ได้ยิน



จากที่เราบันทึก เราสามารถหาค่า T, v_S, R

ประยุกต์ใช้กับงานด้านดาราศาสตร์ (ต้องการ Special relativity)