

CHƯƠNG 2

DAO ĐỘNG SÓNG

A. DAO ĐỘNG CƠ

- 1. Dao động điều hòa .**
- 2. Dao động tắt dần.**
- 3. Dao động cưỡng bức.**

B. SÓNG CƠ

- 1. Sóng cơ.**
- 2. Sóng âm.**
- 3. Sóng dừng.**

A1. DAO ĐỘNG ĐIỀU HÒA

Xét con lắc lò xo gồm quả cầu m gắn vào lò xo chiều dài L và độ cứng k . Kéo m ra khỏi vị trí cân bằng O một đoạn x , xuất hiện lực đàn hồi:

$$F_{dh} = -k.x$$

Áp dụng định luật 2 Newton: $F = ma$

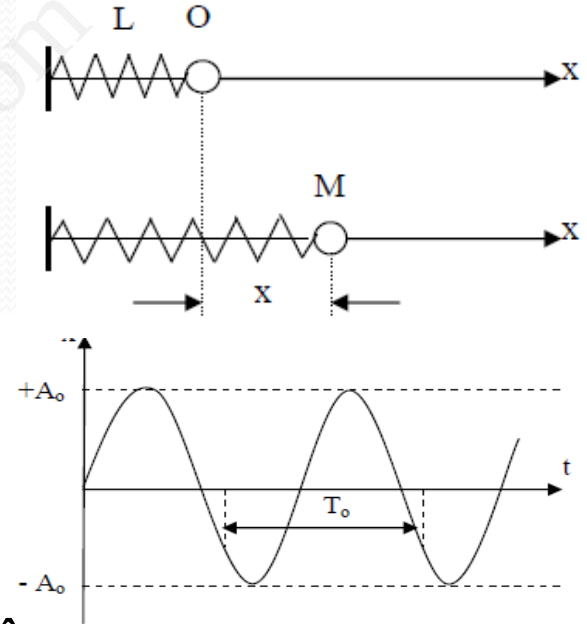
$$\rightarrow -kx = ma = m\ddot{x}$$

$$\rightarrow -kx = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Đặt: $\frac{k}{m} = \omega_0^2$

$$\rightarrow \boxed{\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0}$$

Phương trình vi phân
của dao động cơ điều hòa



Nghiệm của phương dao động cơ điều hòa: $\boxed{x = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)}$

A_0, ω_0, φ - biên độ, tần số góc, pha ban đầu của dao động.

$(\omega_0 t + \varphi)$ và $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ - pha và chu kỳ dao động.

$x = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$	Độ dời của vật m
$v = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$	Vận tốc của vật
$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega_0^2 A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) = -\omega_0^2 x$	Gia tốc của vật
$W_d = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} m \omega_0^2 A_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi)$	Động năng
$W_t = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} k A_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$	Thế năng
$W = W_d + W_t = \frac{1}{2} k A_0^2 = \text{const}$	Cơ năng bảo toàn

Động năng và thế năng trong dao động điều hòa biến đổi tuần hoàn và chuyển hóa lẫn nhau, nhưng cơ năng luôn bảo toàn.

ĐẠO ĐỘNG CƠ ĐIỀU HÒA CỦA CON LẮC VẬT LÝ

- Con lắc vật lý là một vật rắn khối lượng m quay không ma sát quanh một trục ngang cố định đi qua điểm treo của nó.
- Kéo con lắc khỏi VTCB góc nhỏ α . Lực $\vec{P}_t$ tạo momen quay làm con lắc quay quanh trục ngang qua O.

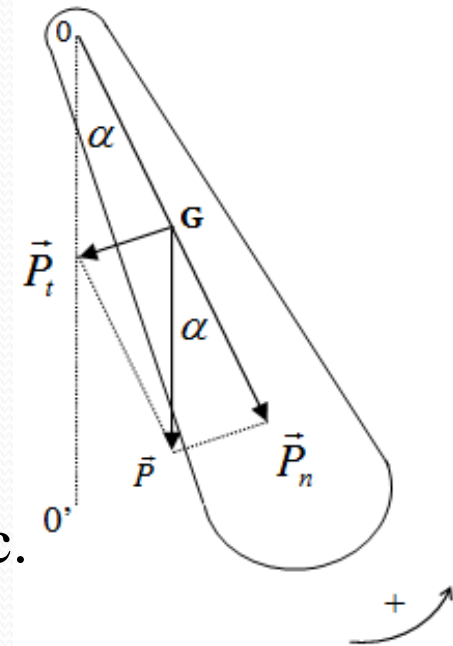
$$\vec{M} = I \vec{\beta} \rightarrow P_t \cdot OG = I \beta$$

$$\rightarrow (mg\alpha)d = I\alpha'' \rightarrow \alpha'' + \frac{mgd}{I}\alpha = 0$$

Đặt: $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgd}{I}}$

$$\rightarrow \boxed{\alpha'' + \omega_0^2 \alpha = 0} \text{ -- PT dao động điều hòa con lắc.}$$

$$\boxed{T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}} \text{ -- Chu kì dao động.}$$

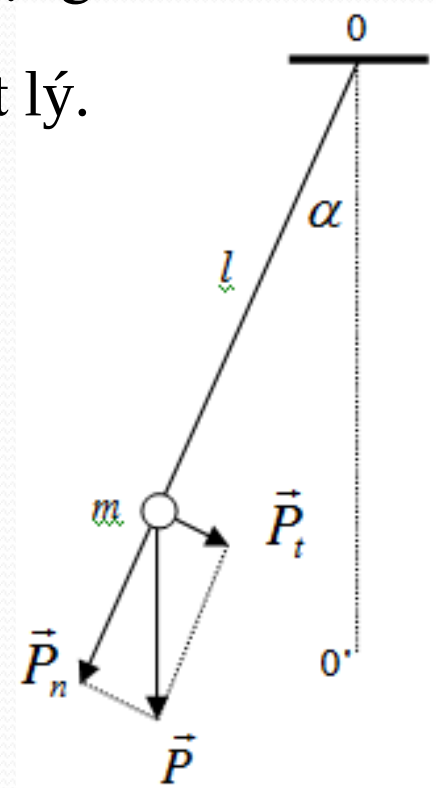


Với: I - mômen quán tính của con lắc đối với trục quay qua O.
 d – khoảng cách từ khối tâm con lắc đến trục quay.

DAO ĐỘNG CƠ ĐIỀU HÒA CỦA CON LẮC ĐƠN

- Con lắc đơn gồm một quả cầu nhỏ khối lượng m (xem như chất điểm) treo vào một sợi dây dài l không giãn không khối lượng.
- Giải bài toán con lắc đơn tương tự như con lắc vật lý.
- Momen quán tính của con lắc đơn $I = ml^2$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$



BÀI TẬP VÍ DỤ 1

Chất điểm m nằm trong trường lực có thế năng:

$$U = U_0(1 - \cos \alpha x), \quad (U_0, \alpha = \text{const})$$

Tìm chu kì dao động nhỏ của m.

Hướng dẫn giải

Lực thế tác dụng lên m: $F = -\frac{dU}{dx} = -U_0\alpha \sin \alpha x \approx -U_0\alpha^2 x$

PT dao động điều hòa của m: $F = ma \rightarrow -U_0\alpha^2 x = mx''$

$$x'' + \frac{U_0\alpha^2}{m} x = 0$$

$$\rightarrow \omega = \sqrt{\frac{U_0\alpha^2}{m}} \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{m}{U_0}}$$

BÀI TẬP VÍ DỤ 2

Một thanh mảnh đồng chất tiết diện đều, chiều dài L thực hiện dao động nhỏ quanh trục nằm ngang vuông góc với thanh và đi qua điểm M nằm trên thanh. Tìm vị trí điểm M để chu kỳ dao động của thanh là nhỏ nhất.

Hướng dẫn giải

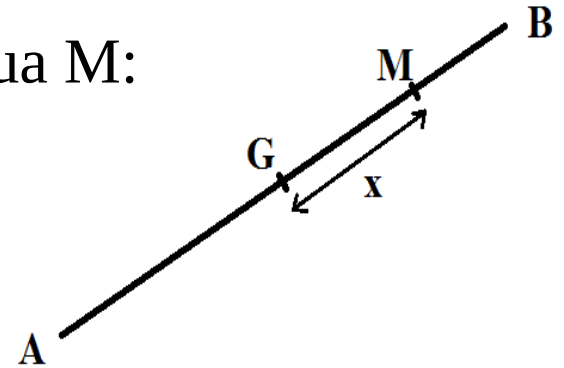
Momen quán tính của thanh đối với trục quay qua M :

$$I = \frac{1}{12} mL^2 + mx^2$$

Chu kỳ dao động điều hòa của thanh:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgx}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} mL^2 + mx^2}{mgx}}$$

Để tìm T min, ta giải PT: $T' = 0 \rightarrow x = \frac{L}{\sqrt{12}} \rightarrow \boxed{T = \frac{2\pi}{\sqrt[4]{3}} \sqrt{\frac{L}{g}}}$



A2. DAO ĐỘNG TẮT DẦN

- Nếu vật dao động trong môi trường có lực cản, năng lượng và biên độ dao động sẽ giảm dần theo thời gian.

- Xét con lắc lò xo chịu lực cản $\vec{F}_c = -r \cdot \vec{v}$, v – vận tốc của lò xo, r – hệ số cản của môi trường.

- Phương trình vi phân của dao động cơ tắt dần:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

- Nghiệm của phương trình (điều kiện $\beta < \omega_0$):

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \phi)$$

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ - tần số dao động riêng. $\beta = \frac{r}{2m}$ - hệ số tắt dần.

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ - tần số dao động tắt dần.

Khảo sát tính chất của dao động tắt dần

- Chu kì dao động:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_o^2 - \beta^2}} > T = \frac{2\pi}{\omega_o}$$

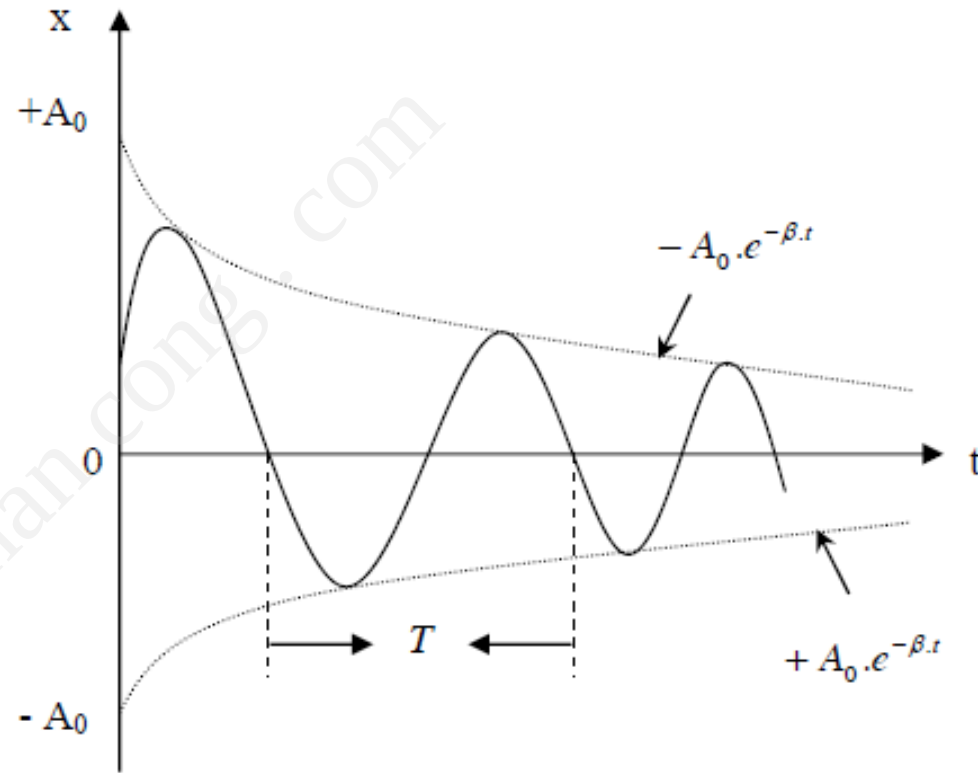
→ Dao động tắt dần diễn biến chậm hơn dao động riêng (dao động điều hòa).

- Biên độ dao động giảm theo t:

$$A_t = Ae^{-\beta t}$$

→ Biên độ dao động tắt dần giảm càng nhanh nếu hệ số cản của môi trường càng lớn.

- Giảm lượng loga: $\delta = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \ln \frac{A_o e^{-\beta t}}{A_o e^{-\beta(t+T)}} = \beta T$



BÀI TẬP VÍ DỤ 3

Biết rằng hệ số tắt dần $\beta = 6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ là rất nhỏ so với tần số góc dao động riêng của hệ. Năng lượng dao động ban đầu của hệ là $E_0 = 10 \text{ J}$. Tìm công của lực cản tác dụng lên hệ sau thời gian $\tau = 25 \text{ s}$.

Hướng dẫn giải

- Lực cản làm năng lượng của hệ dao động bị giảm theo thời gian. Vì vậy, công của lực cản bằng độ biến thiên năng lượng của hệ:

$$W = E_2 - E_1$$

- Năng lượng của hệ dao động tỉ lệ với bình phương biên độ dao động: $E \sim A^2$

- Mà: $A = A_0 e^{-\beta t}$

- Vì vậy, năng lượng của hệ có thể được biểu diễn: $E = E_0 e^{-2\beta t}$

$$\rightarrow W = E_0 e^{-2\beta t} - E_0 = 7,4 - 10 = -2,6 \text{ J}$$

A3. DAO ĐỘNG CƯỜNG BỨC

- **Dao động cưỡng bức:** Nếu một hệ vật dao động tắt dần được bù lại phần năng lượng đã mất do lực cản bởi một lực kích thích biến đổi tuần hoàn theo thời gian thì hệ sẽ dao động tuần hoàn với cùng chu kỳ của lực kích thích.
- Giả sử lực kích thích có dạng: $F_{kt} = F_0 \cdot \cos \Omega t$, Ω – tần số lực kích thích.
- Phương trình dao động cưỡng bức của hệ vật có dạng:

$$x = A \cos(\Omega t + \Phi)$$

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}$$

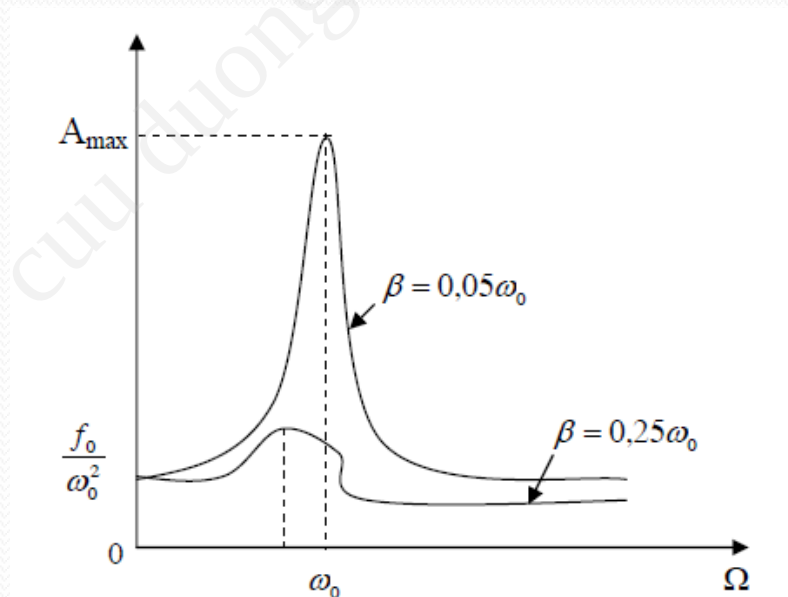
$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{2\beta \cdot \Omega}{\Omega^2 - \omega_0^2}$$

Hiện tượng cộng hưởng

• Khi $\Omega = \Omega_{ch} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \rightarrow A_{\max} = \frac{F_0}{2m\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$

Nếu ma sát nhỏ ($\beta \ll \omega_0$) thì hiện tượng cộng hưởng thể hiện rõ nét ($A_{\max}$ lớn), và ngược lại.

• Nếu $\beta \approx 0 \rightarrow \Omega_{ch} \approx \omega_0 \rightarrow$ Cộng hưởng nhọn.



BÀI TẬP VÍ DỤ 4

Vật thực hiện dao động cưỡng bức trong môi trường có hệ số cản $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$. Biên độ lực cưỡng bức $F_0 = 10^{-4} \text{ N}$ và chu kì dao động riêng của vật $T_0 = 1 \text{ s}$. Cho rằng sự tắt dần là rất nhỏ. Tìm giá trị gần đúng của biên độ cộng hưởng.

Hướng dẫn giải

- Biên độ cộng hưởng: $A_{\max} = \frac{F_0}{2m\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$
- Vì sự tắt dần là rất nhỏ nên $\beta \ll \omega_0$.

$$\rightarrow A_{\max} \approx \frac{F_0}{2m\beta\omega_0} = \frac{F_0}{2m \frac{r}{2m} \omega_0} = \frac{F_0}{r \frac{2\pi}{T}} \approx 4 \text{ cm}$$

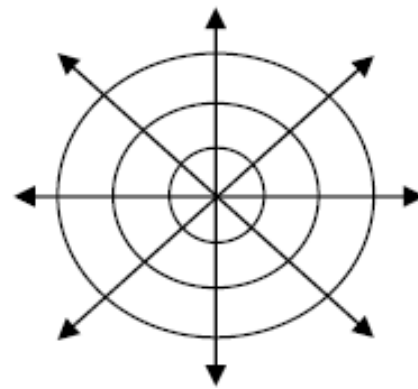
B1. SÓNG CƠ

- Quá trình lan truyền dao động cơ trong môi trường đàn hồi được gọi là sóng đàn hồi hay **sóng cơ**.

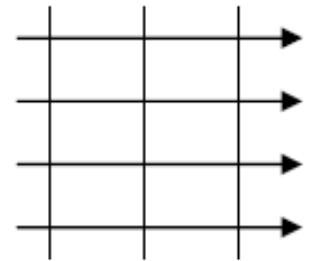
→ Sóng cơ không lan truyền được trong chân không vì trong đó không có môi trường đàn hồi.

- Phương truyền sóng gọi là **tia sóng**.

- Tập hợp những điểm trong trường sóng tại đó các phần tử dao động cùng pha gọi là **mặt sóng**.



Sóng cầu



Sóng phẳng

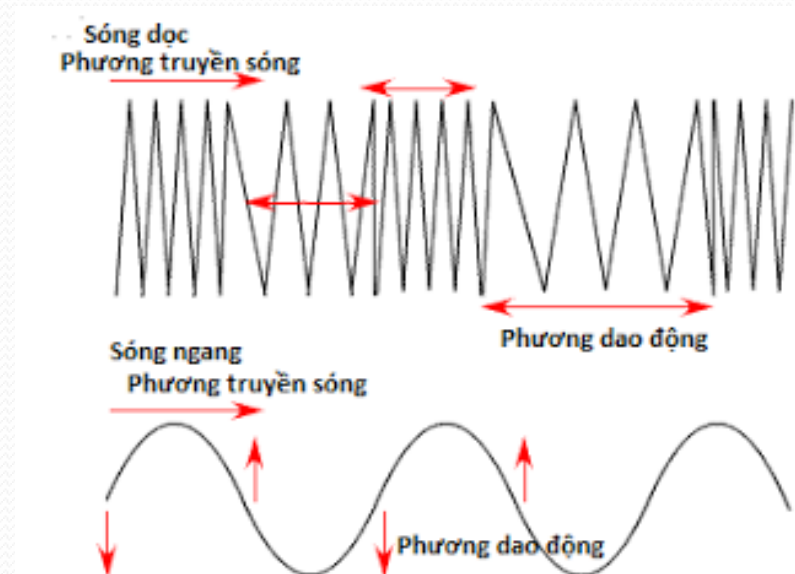
Sóng ngang và sóng dọc

- **Sóng ngang** là sóng trong đó các phần tử của môi trường đàn hồi dao động theo phương vuông góc với tia sóng. Sóng ngang chỉ có thể truyền trong chất rắn và bề mặt chất lỏng.

Ví dụ: sóng điện từ, sóng âm.

- **Sóng dọc** là sóng trong đó các phần tử của môi trường đàn hồi dao động dọc theo tia sóng. sóng dọc có thể truyền trong cả chất rắn, chất lỏng và chất khí.

Ví dụ: lò xo co dãn.



CÁC ĐẶC TRƯNG CỦA SÓNG CƠ

- **Vận tốc sóng v** là quãng đường sóng truyền đi được trong môi trường đàn hồi sau mỗi đơn vị thời gian.

$$\boxed{v \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}} \quad \text{và} \quad \boxed{v \sim \sqrt{T}} \quad (\text{đối với chất khí})$$

Với ρ , T – khối lượng riêng và nhiệt độ của môi trường

Ví dụ: trong đồng $v = 3600$ m/s; trong rượu $v = 1210$ m/s; trong nước $v = 1457$ m/s; trong không khí $v = 330$ m/s ở 0°C và $v = 343$ m/s ở 20°C .

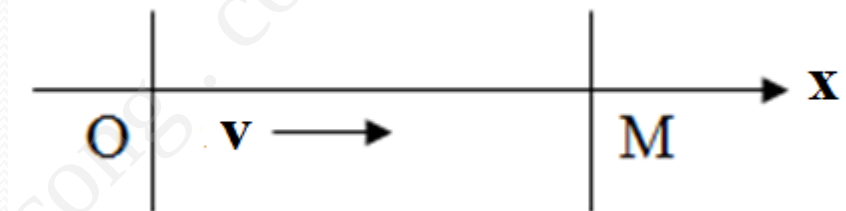
- **Chu kỳ T và tần số f** của sóng có trị số đúng bằng chu kỳ và tần số dao động của các phần tử trong trường sóng.
- **Bước sóng λ** là quãng đường sóng truyền đi được sau mỗi chu kỳ:

$$\boxed{\lambda = vT = \frac{v}{f}}$$

PHƯƠNG TRÌNH SÓNG

- Xét một sóng phẳng truyền theo phương Oy trùng với tia sóng. Giả sử dao động của phần tử nằm tại điểm O ứng với tọa độ $x=0$ có dạng:

$$u_o = A \cos \omega t$$



- Dao động của phần tử nằm tại điểm M có tọa độ $x \neq 0$ có dạng:

$$u_M = A \cos \omega(t \pm \tau) = A \cos \omega\left(t \pm \frac{x}{v}\right) = A \cos\left(\omega t \pm \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = A \cos(\omega t \pm kx)$$

PT trên biểu diễn độ dời u của phần tử M tại thời điểm t .

Dấu (+) nếu $x < 0$ (điểm M nằm sau O xét theo phương truyền sóng).

Dấu (-) nếu $x > 0$ (điểm M nằm trước O xét theo phương truyền sóng).

$k = 2\pi/\lambda$ – số sóng.

- Mật độ năng lượng trung bình của sóng:

$$\overline{w}_0 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2$$

BÀI TẬP VÍ DỤ 5

Một sóng cơ truyền dọc theo trục Ox có phương trình:

$$u = A \cos(\omega t - kx)$$

Tìm tỉ số giữa vận tốc cực đại của các phần tử môi trường với vận tốc truyền sóng.

Hướng dẫn giải

- Vận tốc truyền sóng: $v_1 = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{2\pi / \omega} = \frac{\omega}{k}$
- Vận tốc dao động của phần tử môi trường: $v_2 = u' = -A\omega \sin(\omega t - kx)$
→ vận tốc cực đại của phần tử môi trường: $v_{2\max} = A\omega$

$$\rightarrow \boxed{\frac{v_{2\max}}{v_1} = \frac{A\omega}{\omega / k} = Ak}$$

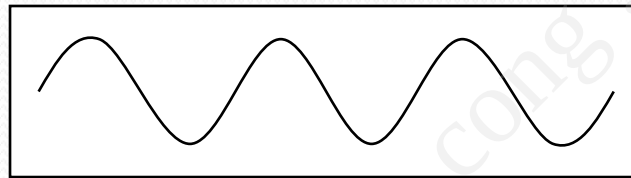
B2. SÓNG ÂM

SÓNG ÂM

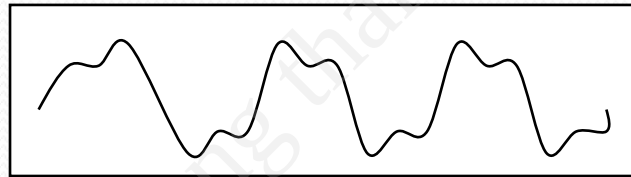
- **Sóng âm** là một dạng sóng cơ có thể lan truyền trong các môi trường khí, lỏng, rắn.
- Nguồn gốc sóng âm:
 - Vật dao động làm cho môi trường vật chất ở xung quanh lần lượt bị nén lại rồi dãn ra → xuất hiện lực đàn hồi làm dao động được truyền cho các phân tử vật chất ở xa hơn.
 - Sóng âm lọt vào tai tác dụng lên màng nhĩ áp suất biến thiên làm màng nhĩ dao động → Dao động của màng nhĩ truyền đến dây thần kinh thính giác cho ta cảm giác âm.
- Trong chất khí và chất lỏng, sóng âm là sóng dọc vì trong các chất này, lực đàn hồi chỉ xuất hiện khi có biến dạng nén, dãn.
- Trong chất rắn, sóng âm gồm cả sóng ngang và sóng dọc, vì lực đàn hồi xuất hiện cả khi bị biến dạng lệch và biến dạng nén, dãn.

Những đặc trưng của âm

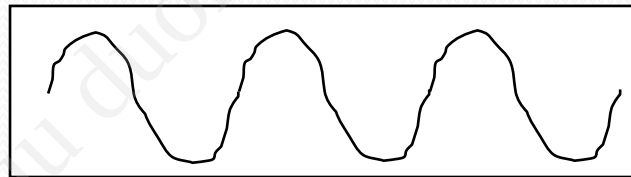
- **Độ cao** của âm do tần số âm qui định. Âm càng cao thì tần số càng lớn. Tai người nghe được âm có tần số từ 16 Hz đến 20.000 Hz.
- **Âm sắc** do dạng đồ thị dao động của âm qui định.



Aâm thoa



Ghita



Violon

- **Độ to** của âm do cường độ âm qui định. Tuy nhiên cảm giác âm to hay nhỏ ngoài phụ thuộc vào cường độ âm, còn phụ thuộc vào tần số âm, Với cùng cường độ, âm có tần số cao nghe to hơn âm tần số thấp.

HIỆU ỨNG DOPPLER

Hiệu ứng Doppler: Sự thay đổi tần số âm do nguồn phát âm chuyển động tương đối so với nguồn thu.

$$f' = \frac{v \pm v_m}{v \pm v_s} f$$

Trong đó: f – tần số âm do nguồn âm phát ra.

f' – tần số âm mà nguồn thu thu được.

v – vận tốc âm trong môi trường.

v_s, v_m – vận tốc nguồn phát, nguồn thu.

Dấu (+) nếu nguồn thu/nguồn phát chuyển động ngược hướng với âm.

Dấu (-) nếu nguồn thu/nguồn phát chuyển động cùng hướng với âm.

Ví dụ:

Nguồn phát đứng yên ($v_s = 0$),
nguồn thu lại gần nguồn phát:

$$f' = \frac{v + v_m}{v} f$$

Nguồn thu đứng yên ($v_m = 0$),
nguồn phát lại gần nguồn thu:

$$f' = \frac{v}{v - v_s} f$$

BÀI TẬP VÍ DỤ 6

Một ô tô chuyển động với tốc độ 54 km/h và phát ra tiếng còi có tần số 500 Hz. Khi chạy ngang qua một hành khách đang đứng ở bên đường thì tần số âm mà người đó cảm nhận được thay đổi đột ngột một lượng là bao nhiêu? Biết tốc độ truyền âm trong không khí là 336 m/s.

Hướng dẫn giải

- Khi xe tiến lại gần hành khách, tần số âm mà người đó nghe được:

$$f_1 = \frac{v}{v - v_s} f$$

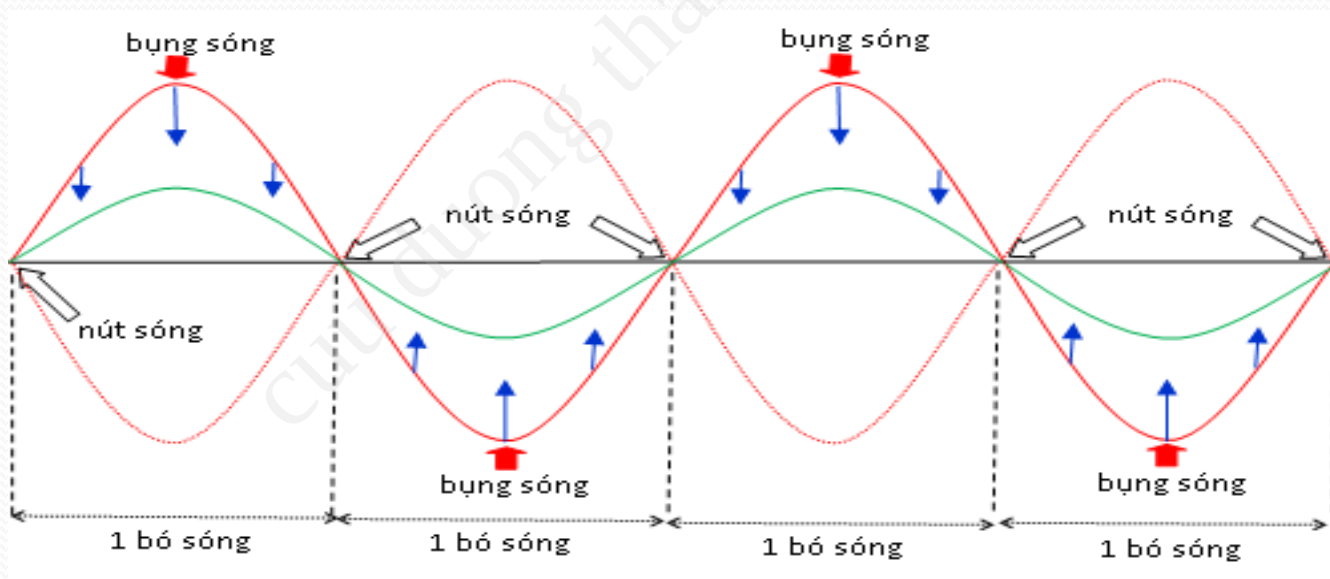
- Khi xe ra xa hành khách, tần số âm mà người đó nghe được:

$$f_2 = \frac{v}{v + v_s} f$$

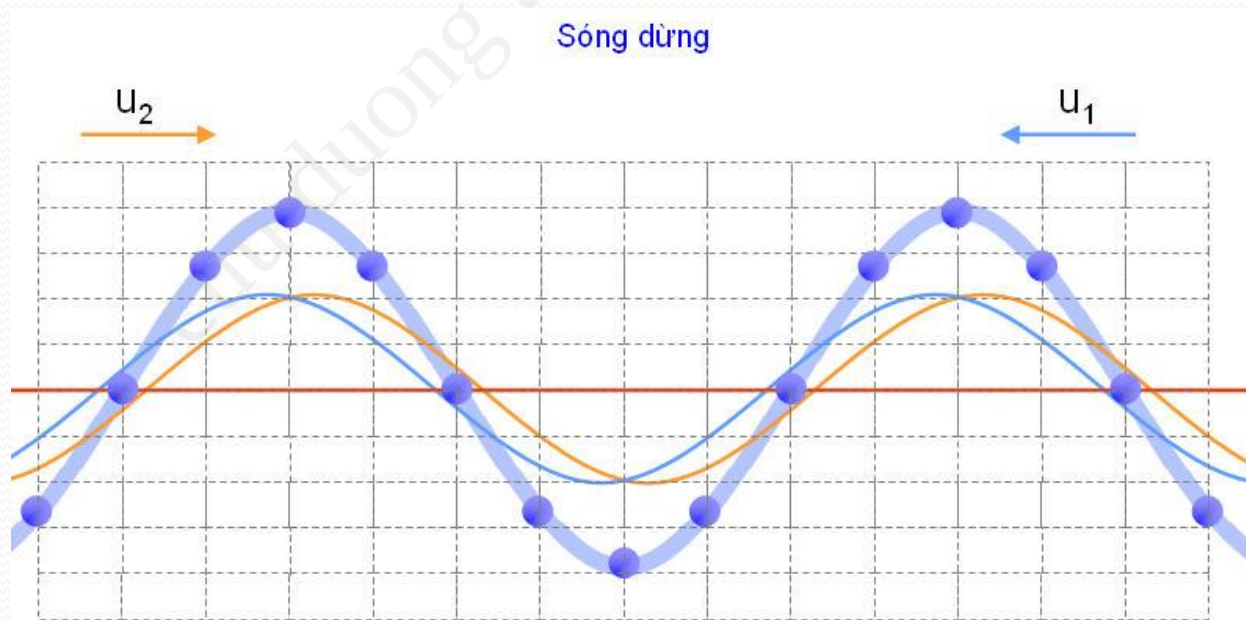
→ Tần số âm thay đổi một lượng: $\Delta f = f_1 - f_2 = 44,73 \text{ Hz}$

B3. SÓNG DỪNG

- **Sóng dừng** là sóng có các bụng và nút sóng cố định.
- **Bụng sóng** là những điểm có biên độ dao động cực đại.
- **Nút sóng** là những điểm có biên độ dao động cực tiểu (đứng yên).
- Khoảng cách giữa hai bụng sóng (nút sóng) liên tiếp bằng $\lambda/2$.
- Khoảng cách giữa một bụng sóng và một nút sóng liên kề bằng $\lambda/4$.



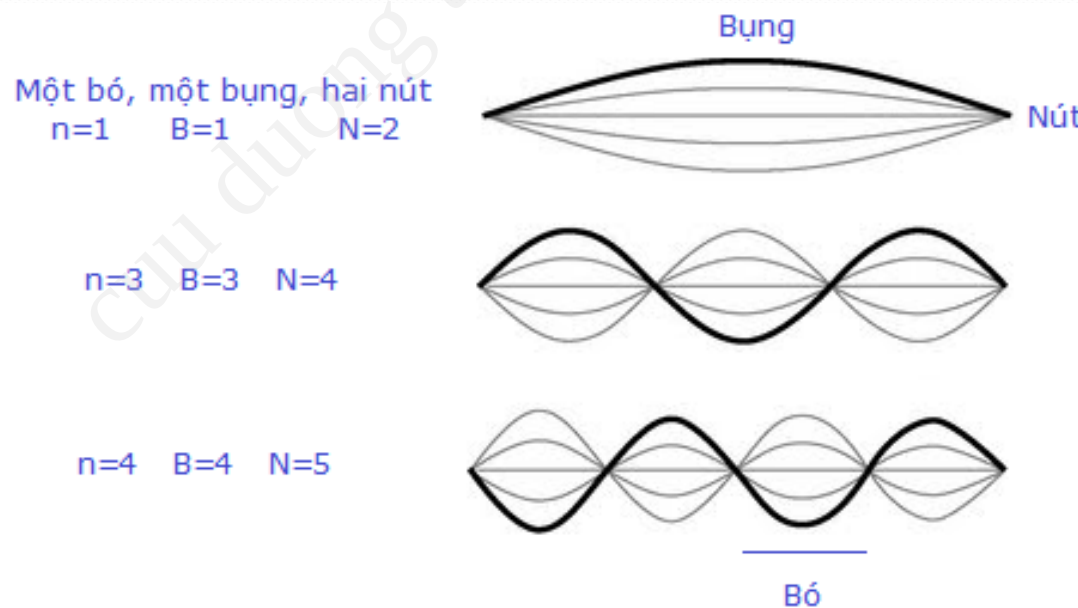
- Sóng dừng là sự giao thoa giữa sóng tới và sóng phản xạ:
- **Sóng tới** là sóng lan truyền đến một điểm trên phương truyền sóng.
- **Sóng phản xạ** là sóng khi lan truyền thì gặp một vật cản bị phản xạ ngược trở lại.
- Nếu vật cản di động: Sóng phản xạ cùng pha sóng tới tại điểm phản xạ.
- Nếu vật cản cố định: Sóng phản xạ ngược pha với sóng tới tại điểm phản xạ.



Khảo sát sóng dừng trên một sợi dây đàn hồi

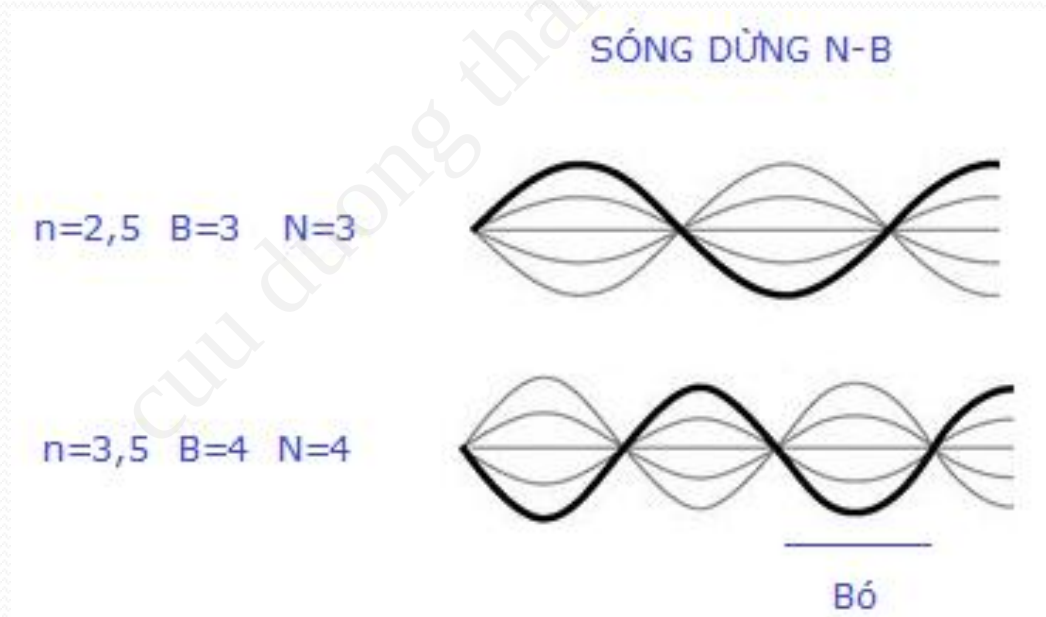
A) Hai đầu dây cố định.

- Hai đầu dây là hai nút sóng.
- Điều kiện để có sóng dừng: chiều dài của sợi dây phải bằng một số nguyên lần nửa bước sóng: $l = n \frac{\lambda}{2}$, $n=1,2,3\dots$
- Số bụng sóng = n .
- Số nút sóng = $n+1$.



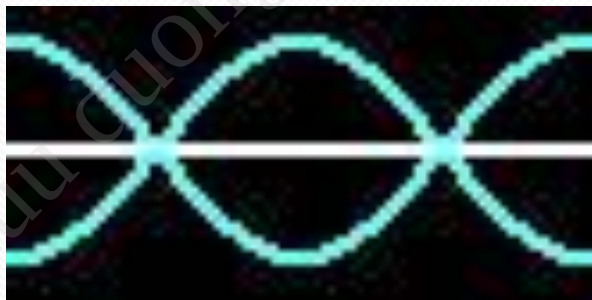
B) Một đầu dây cố định, một đầu dây tự do.

- Đầu cố định là nút sóng, đầu tự do là bụng sóng.
- Điều kiện để có sóng dừng: chiều dài của sợi dây phải bằng một số bán nguyên lần nửa bước sóng : $l = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2}$, $n=0,1,2,3,\dots$
- Số bụng sóng = Số nút sóng = $n+1$.



C) Hai đầu dây tự do.

- Hai đầu dây là hai bụng sóng.
- Điều kiện để có sóng dừng: chiều dài của sợi dây phải bằng một số nguyên lần nửa bước sóng: $l = n \frac{\lambda}{2}$, $n=2,3,\dots$
- Số bụng sóng = $n+1$.
- Số nút sóng = n .



$n=2$, Số bụng sóng = 3, Số nút sóng = 2.

BÀI TẬP VÍ DỤ 7

Một sợi dây chiều dài L có một đầu cố định và một đầu tự do. Khi dây dao động với tần số f ta quan sát trên dây có sóng dừng với N bụng sóng. Tìm tốc độ truyền sóng trên dây.

Hướng dẫn giải

- Điều kiện để có sóng dừng trên dây có một đầu cố định và một đầu tự do là:

$$L = (n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2}$$

- Số bụng sóng: $N = n + 1$

$$\rightarrow L = (N - \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{4L}{2N - 1}$$

- Tốc độ truyền sóng:

$$v = \lambda f = \frac{4L}{2N - 1} f$$