

Лекція 8

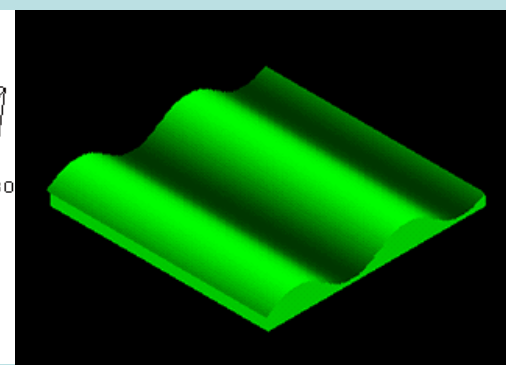
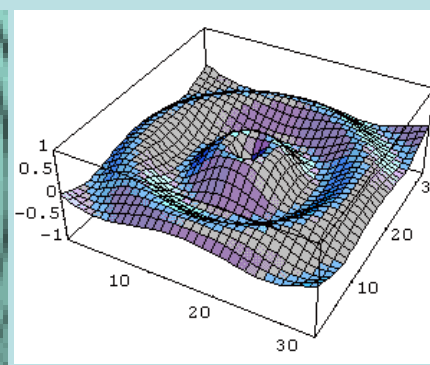
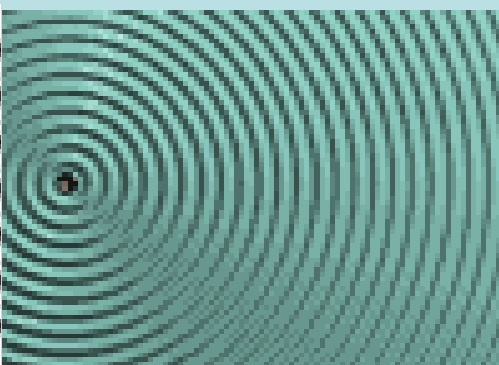
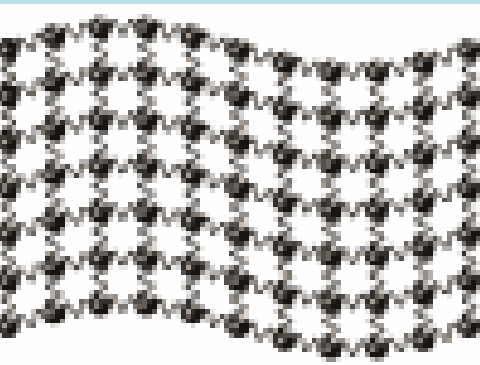
ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ

1. Загальні закономірності хвильових процесів. Поздовжні та поперечні хвилі
2. Рівняння гармонічної хвилі, диференціальне хвильове рівняння
3. Поширення хвиль у середовищах із дисперсією. Швидкість механічних хвиль в газах, рідинах та твердих тілах
4. Інтерференція механічних хвиль
5. Ефект Доплера
6. Потік енергії хвилі
7. Звукові хвилі, їх основні характеристики. Ультразвук. Область чутності. Акустика приміщень та споруд

1. Загальні закономірності хвильових процесів. Поздовжні та поперечні хвилі.

Хвилею, або хвильовим процесом називають процес поширення коливань у суцільному середовищі.

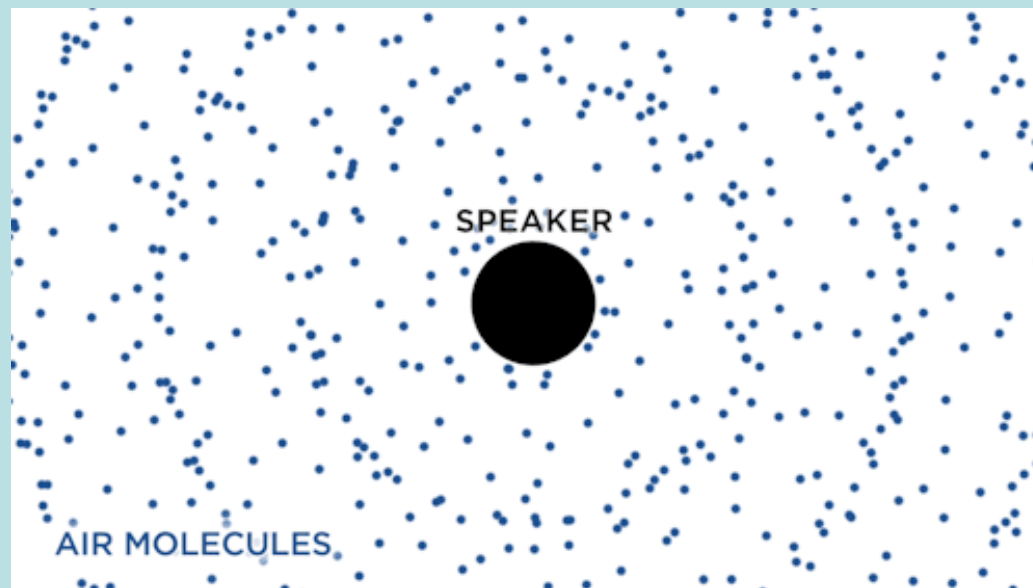
Суцільним вважають середовище, яке неперервно розповсюджується у просторі (тобто не враховують його дискретної будови) і характеризують пружними властивостями.



При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а коливаються навколо своїх положень рівноваги.

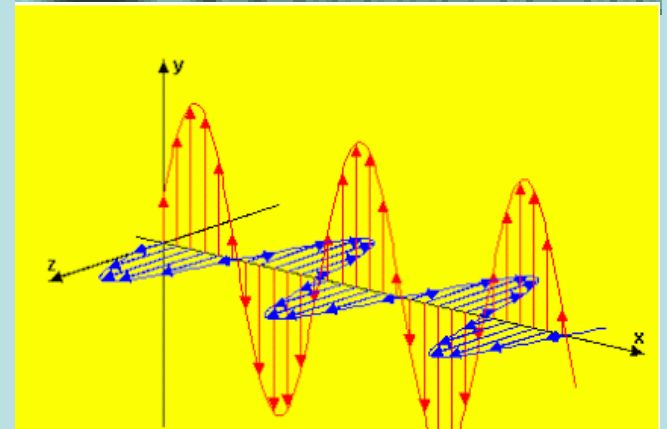
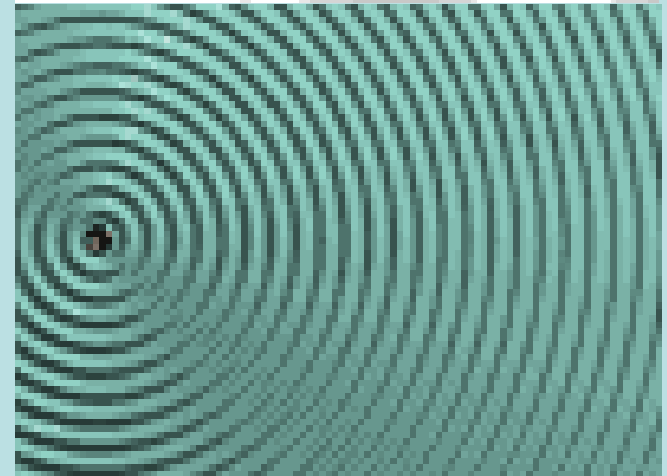
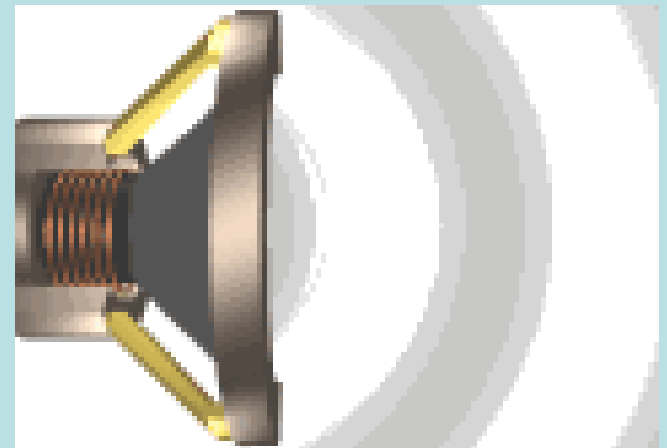
Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передаються лише стан коливального руху і його енергія.

Основною властивістю усіх хвиль, не залежно від природи, є перенесення енергії хвилі без перенесення речовини.



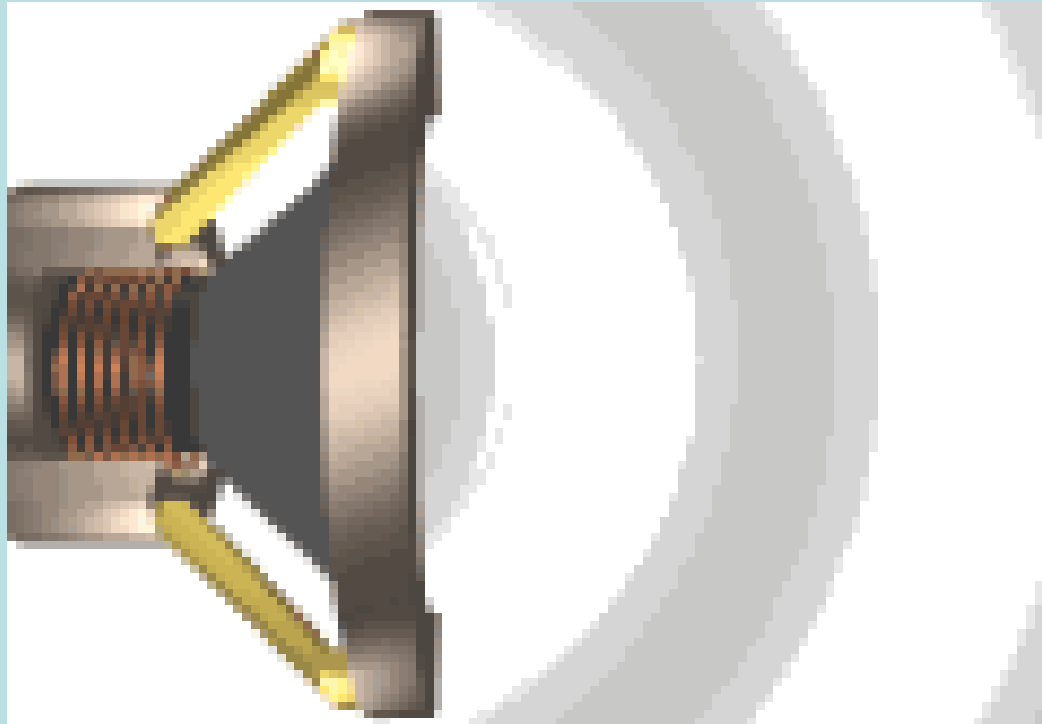
Типи хвиль:

- механічні (пружні) хвилі;
- хвилі на поверхні рідини;
- електромагнітні хвилі.

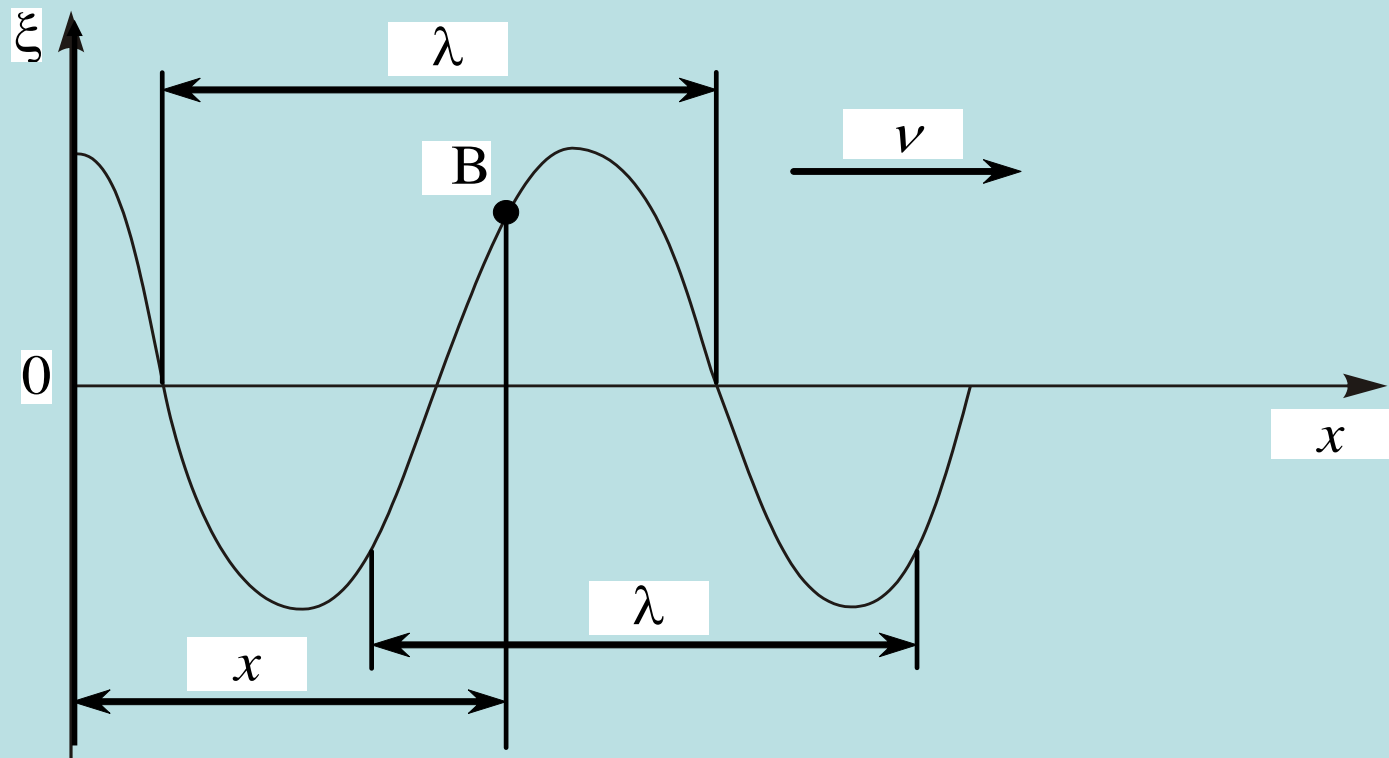


Пружними хвилями називають механічні збурення, що поширюються в пружному середовищі.

Пружну хвилю називають *гармонічною*, якщо гармонічні коливання здійснюють частинки середовища.

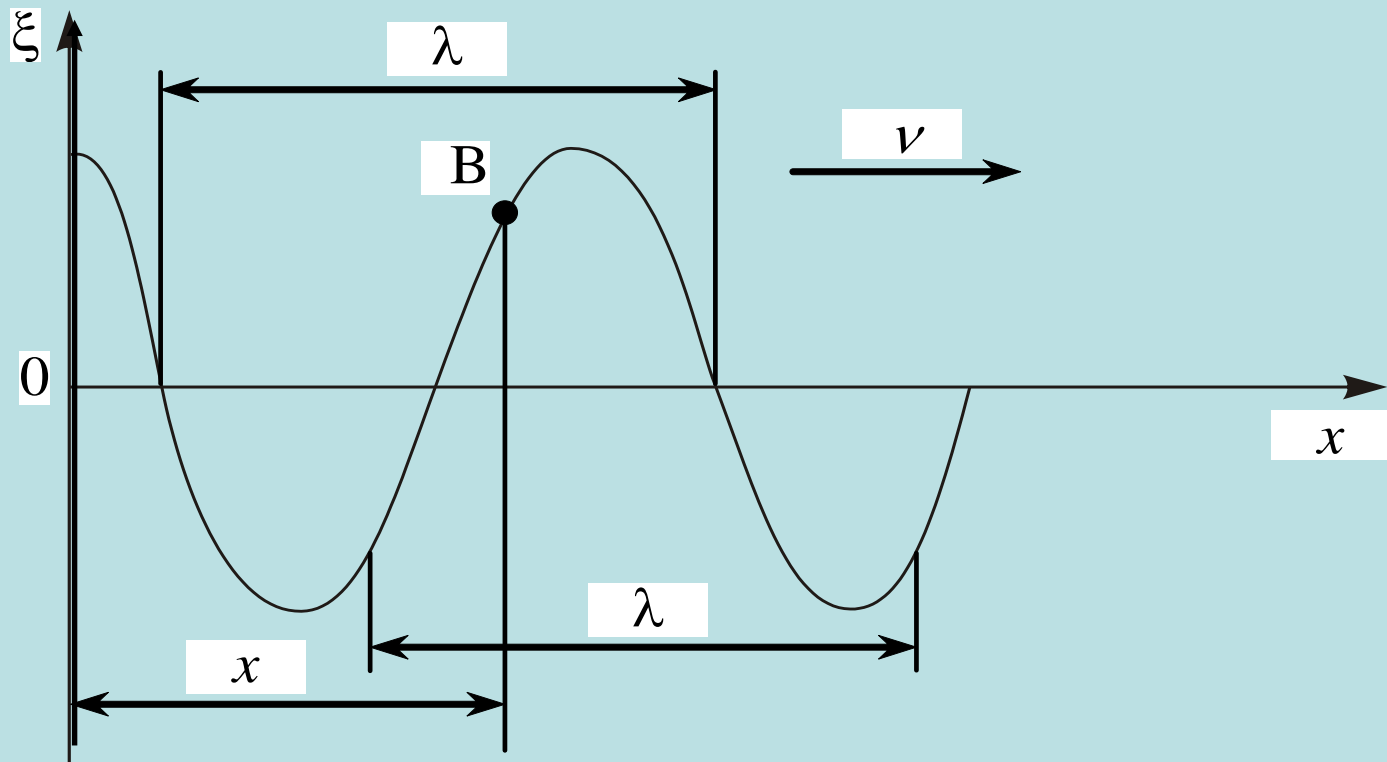


Приведемо графік залежності зміщення частинок середовища ξ від відстані x між частинкою, що коливається, і джерелом пружної хвилі та часу t : $\xi = \xi(x, t)$:



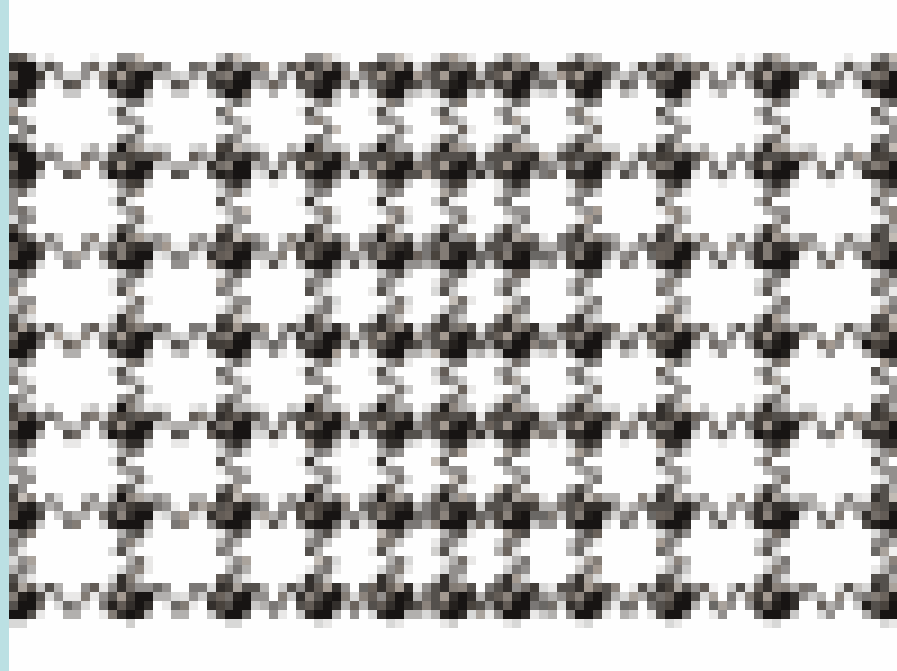
Довжиною хвилі λ називають відстань між найближчими точками, що коливаються в одній фазі. Довжина хвилі дорівнює відстані, на яку вона поширюється за час рівний періоду:

$$\lambda = \nu T, \quad \lambda = \frac{\nu}{\nu}$$

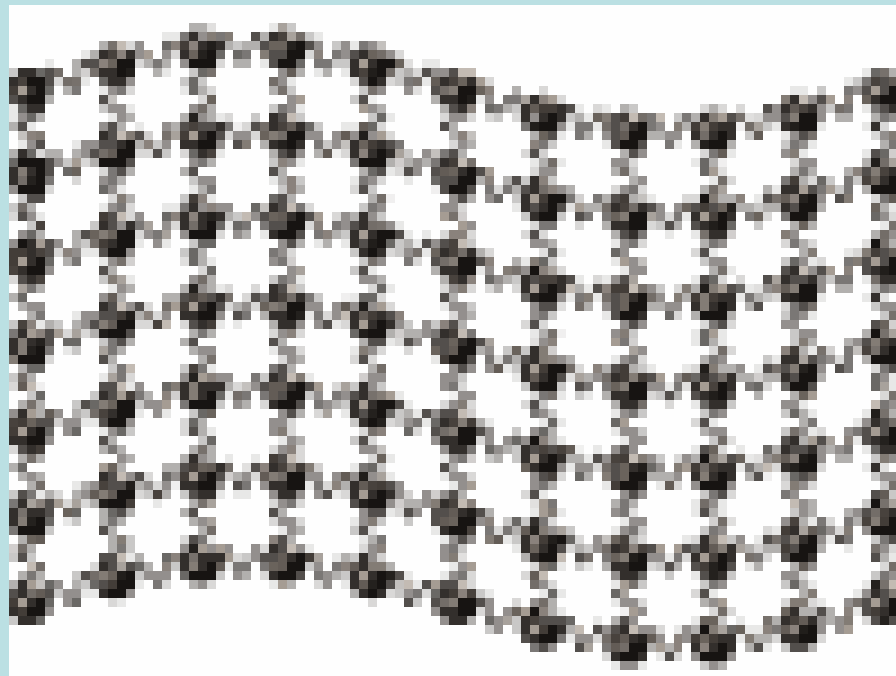


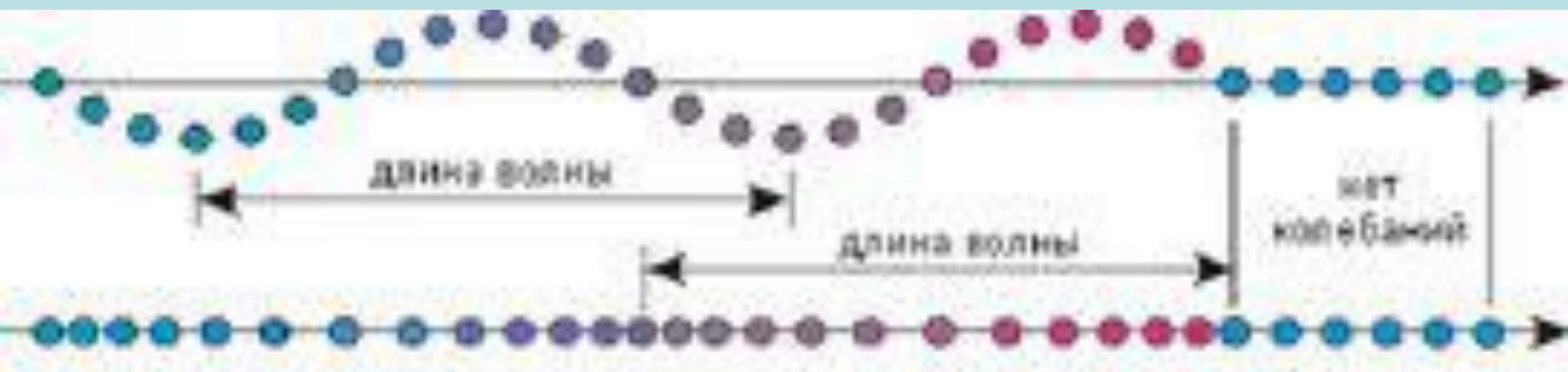
Пружні хвилі бувають повздовжніми або поперечними.

Повздовжніми називають хвилі, в яких частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі. Можуть поширюватися у середовищі, в якому виникають пружні сили *при деформаціях стиску та розтягу*, тобто в твердих, рідких та газоподібних середовищах.



Поперечними – хвилі, в яких частинки середовища коливаються перпендикулярно напрямку поширення хвилі (наприклад, світлові хвилі). Можуть поширюватися у середовищі, в якому виникають пружні сили *при деформаціях зсуву*, тобто фактично тільки в твердих тілах.

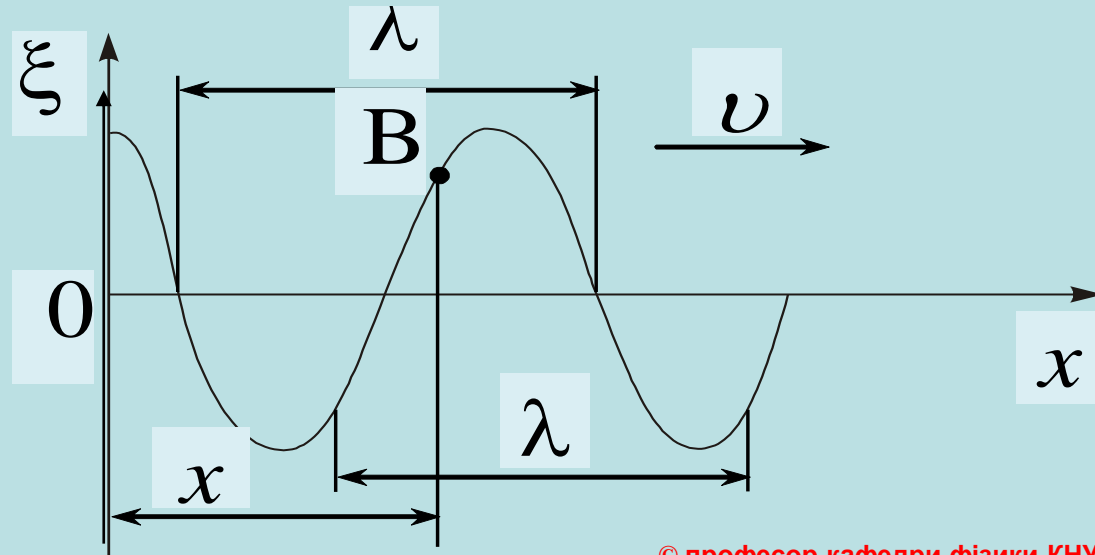




2. Рівняння гармонічної хвилі, диференціальне хвильове рівняння.

Розглянемо плоску хвилю, яка поширюється у напрямі осі Ox . За такої умови хвильові поверхні будуть перпендикулярними до осі Ox , а зміщення плоскої хвилі частинок буде визначатися рівнянням:

$$\xi = A \sin \omega t.$$



Коливання частинок середовища, які знаходяться на відстані x від джерела будуть запізнюватися на час:

$$\tau = x / v$$

де v – швидкість поширення хвилі:

$$\xi = A \sin \omega(t - \tau) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{vT} \right),$$

або

$$\xi = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

$$\xi = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\nu T}\right) = A \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{\nu}\right) = A \sin(\omega t - kx),$$

$k = \frac{\omega}{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – **хвильове число**, яке показує кількість довжин хвиль, що вміщуються на відрізок 2π ;

а $\omega t - kx$ – **фаза хвилі**.

Рівняння

$$\xi = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad \text{та} \quad \xi = A \sin(\omega t - kx),$$

називають *рівняннями монохроматичної біжучої хвилі*.

Ці рівняння є розв'язком *диференціального хвильового рівняння плоскої хвилі* :

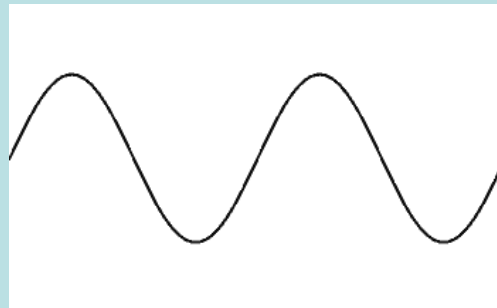
$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \xi}{dt^2}.$$

3. Поширення хвиль у середовищах із дисперсією. Швидкість механічних хвиль в газах, рідинах та твердих тілах.

Хвильовий процес характеризують фазовою і груповою швидкостями.

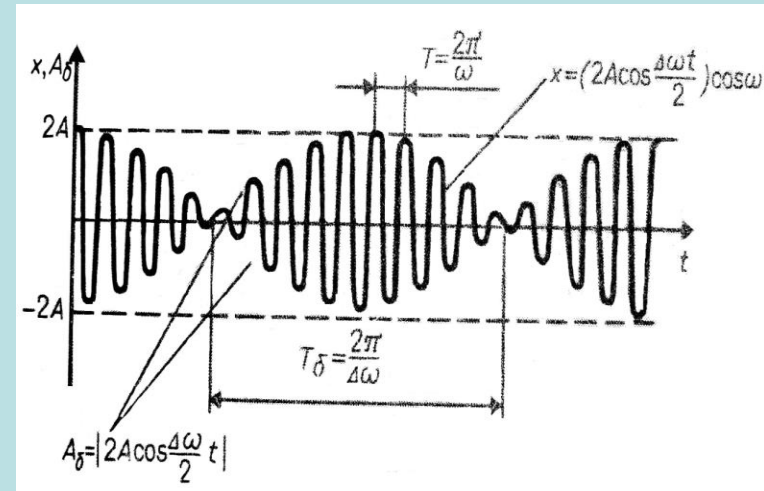
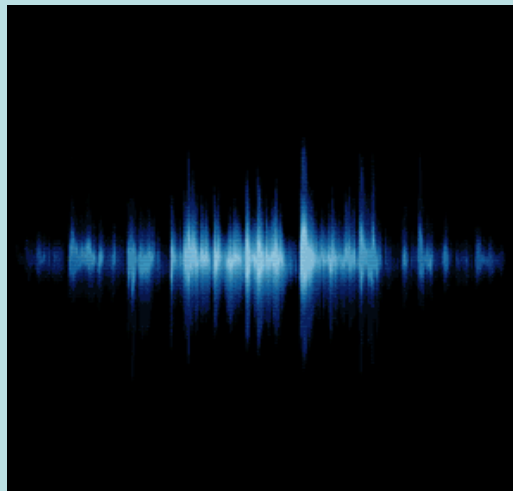
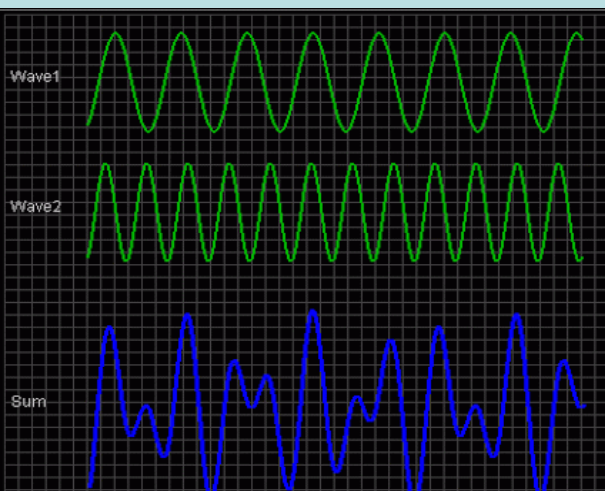
Фазова швидкість – швидкість поширення окремої хвилі у просторі, яка в свою чергу є швидкістю переміщення фази даної хвилі:

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



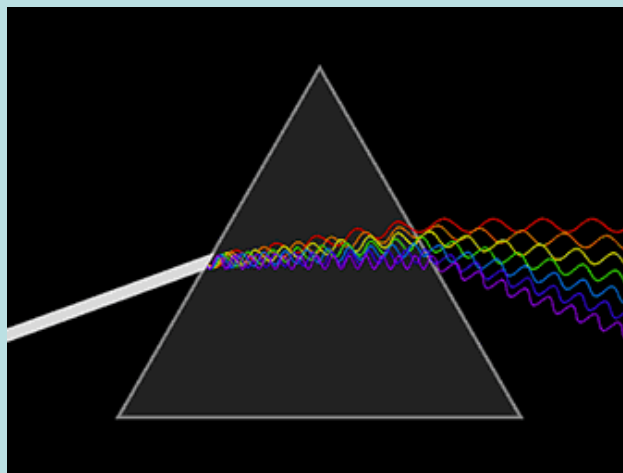
Групова швидкість – це швидкість групи, пучка, цугу хвиль (*групою хвиль* або *хвильовим пакетом* називають квазі-синусоїдальну хвилю, яка являє собою сукупність синусоїдальних хвиль, частоти яких мало відрізняються від деякої основної частоти ω):

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$



Фазова швидкість у вакуумі не залежить від частоти коливань або довжини хвилі. При поширенні хвиль різної частоти або довжини у тому чи іншому середовищі їх фазова швидкість виявляється різною.

Явище залежності фазової швидкості хвиль від їх частоти називається *дисперсією*.



Величину $\frac{dv}{d\lambda}$ називають *показником дисперсії*. При відсутності дисперсії у вакуумі $\frac{dv}{d\lambda} = 0$, фазова і групова швидкості співпадають.

Дисперсію називають *нормальною* при

$$\frac{d\nu}{d\lambda} > 0,$$

тобто $n < \nu$.

Дисперсію називають *аномальною* при

$$\frac{d\nu}{d\lambda} < 0,$$

тобто $n > \nu$.

У загальному вигляді швидкість хвильового процесу залежить від:

$$v = \sqrt{\frac{\text{міра пружності середовища}}{\text{міра інертності середовища}}}.$$

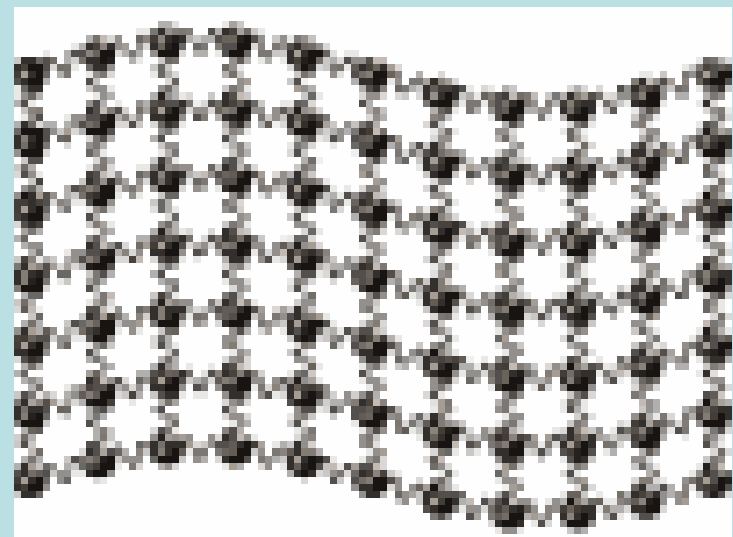
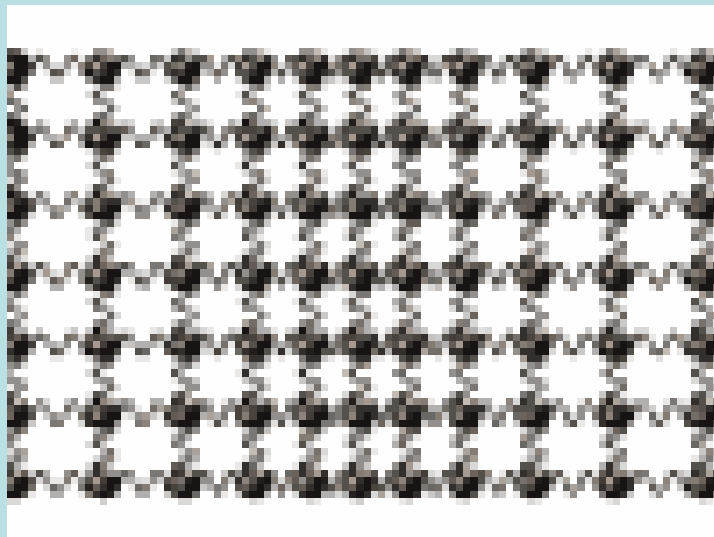
У *твердих тілах* можуть поширюватися поздовжні і поперечні хвилі.

Швидкість поширення хвиль у твердих тілах:

$$v_{\text{повз}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad v_{\text{попер}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

де E – модуль Юнга,

G – модуль зсуву.



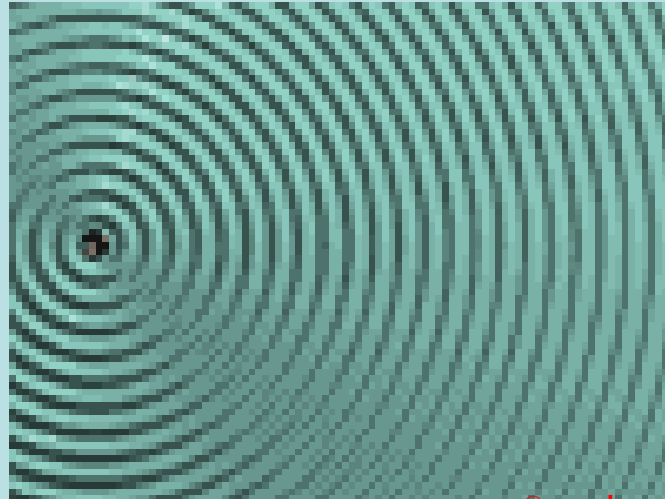
У рідинах і газах можуть поширюватися тільки поперечні хвилі.

Швидкість поширення хвиль у рідинах:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}},$$

де k – модуль об'ємного стиску;

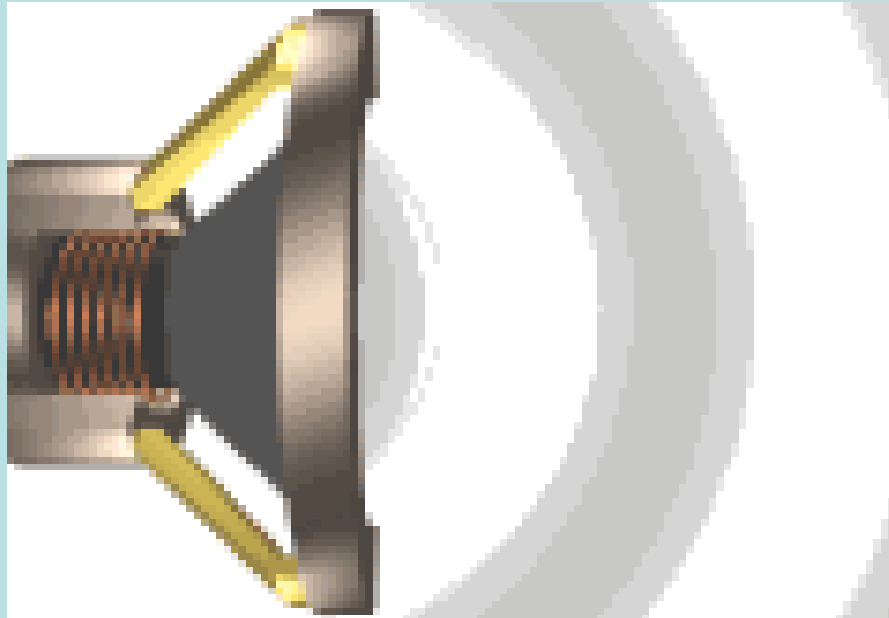
β – адіабатний коефіцієнт об'ємного стиску.



Швидкість поширення хвиль у газах:

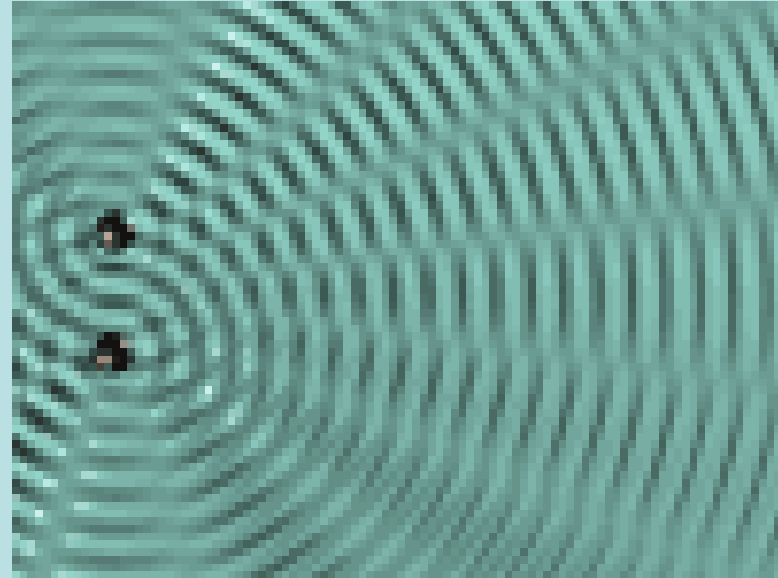
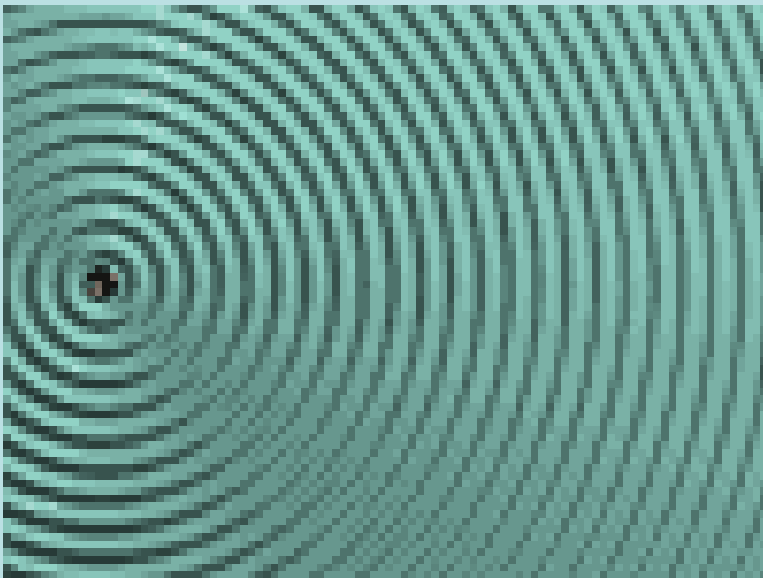
$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad \text{– формула Лапласа,}$$

де γ – показник адіабати.



4. Інтерференція механічних хвиль.

Інтерференцією хвиль називають явище накладання хвиль, при якому амплітуда результуючих коливань різних ділянок середовища з часом не змінюється і в загальному випадку не дорівнює сумі амплітуд складових коливань, утворюючи стійкі зони з максимальними і мінімальними амплітудами результуючих коливань.



Умови виникнення інтерференційної картини:

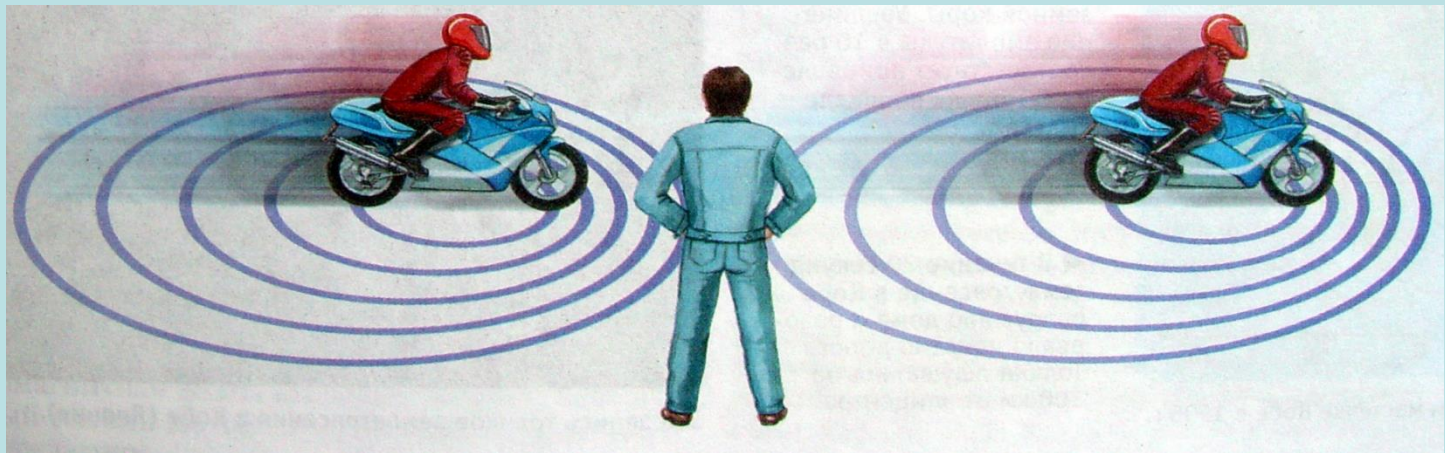
- коливання частинок середовища, що збуджуються інтерферуючими хвилями, мають відбуватись в однакових напрямках;
- частоти їх коливань мають бути однаковими;
- зсув фаз між коливаннями частинки, зумовленими інтерферуючими хвилями, з часом не змінюється.

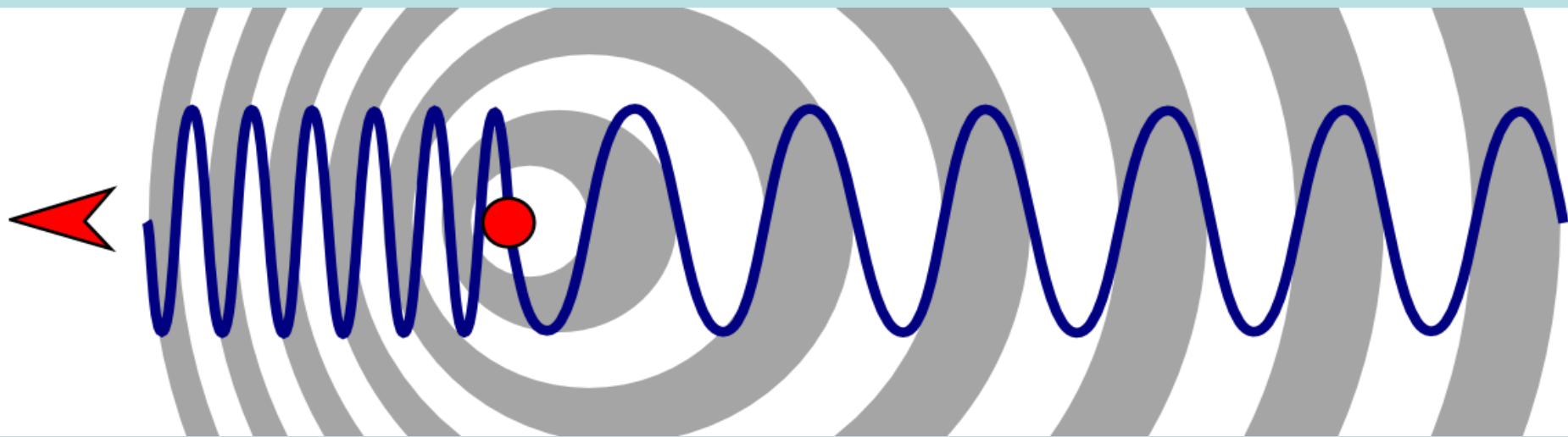
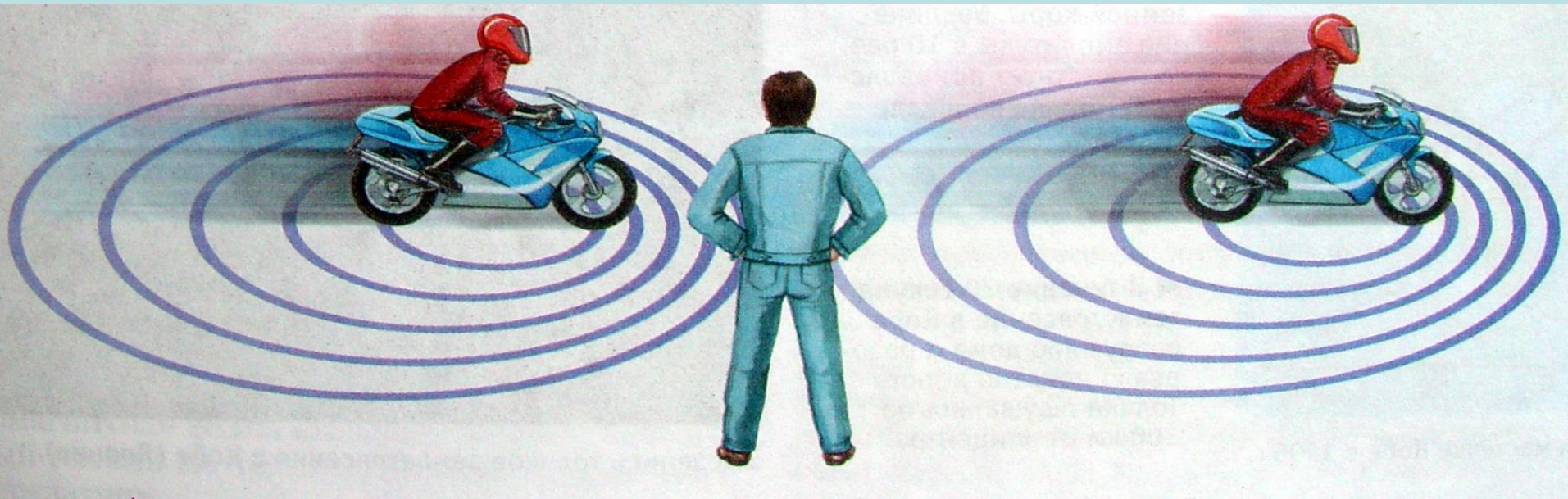
Хвилі, що відповідають цим умовам називають *когерентними*.



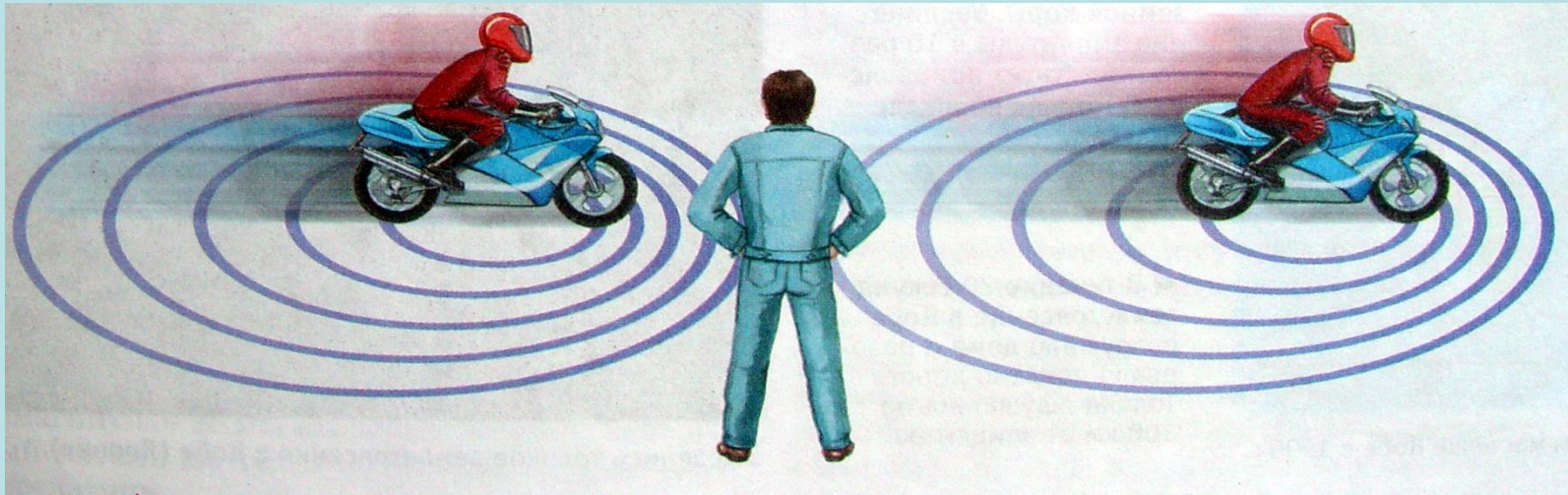
5. Ефект Доплера

Досліди показують, що коли джерело і приймач звуку нерухомі відносно середовища, в якому поширюються звукові хвилі, то частота звуку, яку реєструє приймач, дорівнює частоті звуку, яку випромінює джерело. Якщо ж джерело і приймач звукових хвиль перебувають у русі відносно одне одного, то частота звуку, яку реєструє приймач, відрізняється від частоти звуку, яку генерує джерело.

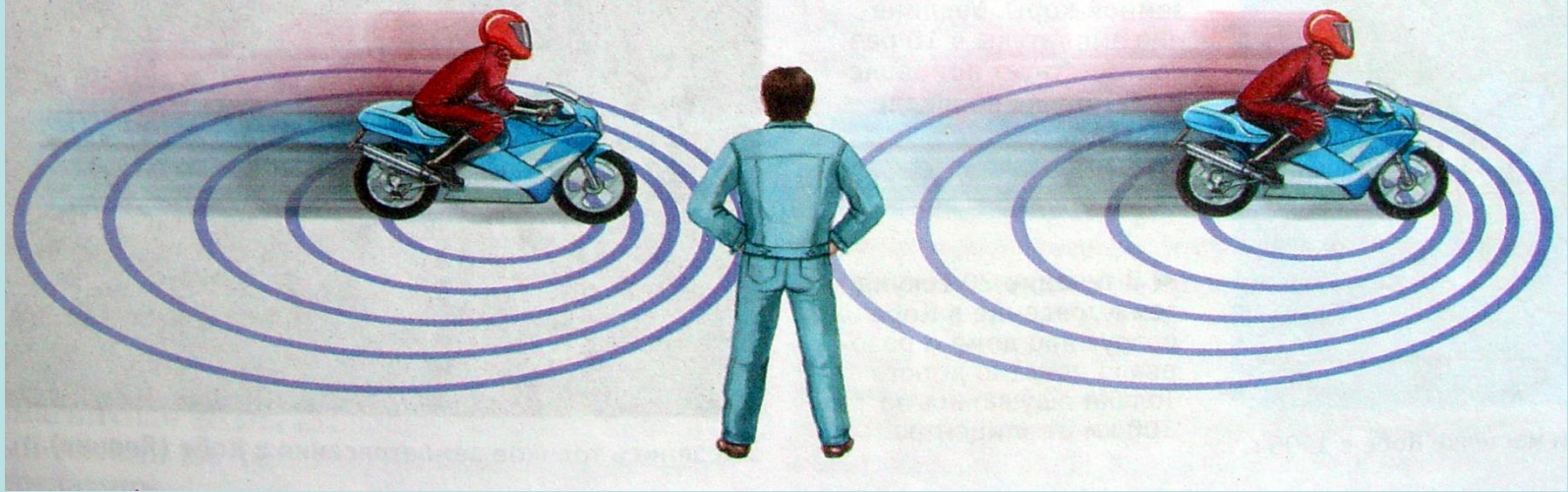




Зміна частоти звуку, що сприймається при відносному русі джерела і приймача звуку, називається *ефектом* або *явищем Доплера*.



Ефект названий на честь австрійського фізика **Крістіана Доплера**, який у **1842 році** теоретично обґрунтував залежність частоти коливань від напрямку руху і швидкості спостерігача. А у **1845 році** нідерл. фізик Христофор **Хенрік Дідерік Бейс-Баллот** за допомогою експерименту з паровозом і музикантами, перевірів гіпотезу Доплера, в результаті чого ефект Доплера був доведений.



Якщо частота звуку, яку випромінює джерело ν_0 , то частота звуку, яку реєструє приймач ν :

$$\nu = \nu_0 \frac{\nu \pm \nu_{\text{прийм}}}{\nu \mp \nu_{\text{джер}}}$$

де ν – швидкість звуку в даному середовищі.

Верхній знак береться при відносному зближенні джерела і приймача, нижній – при відносному віддаленні їх.

Ефект Доплера широко використовується у багатьох галузях науки і техніки, а також у повсякденному житті, де потрібно виміряти швидкість руху тіл, які можуть випромінювати або відбивати хвилі.

В залежності від типу хвиль розрізняють два види Ефекту Доплера: при поширенні електромагнітних хвиль – оптичний ефект, і при поширенні звукових хвиль – акустичний ефект.

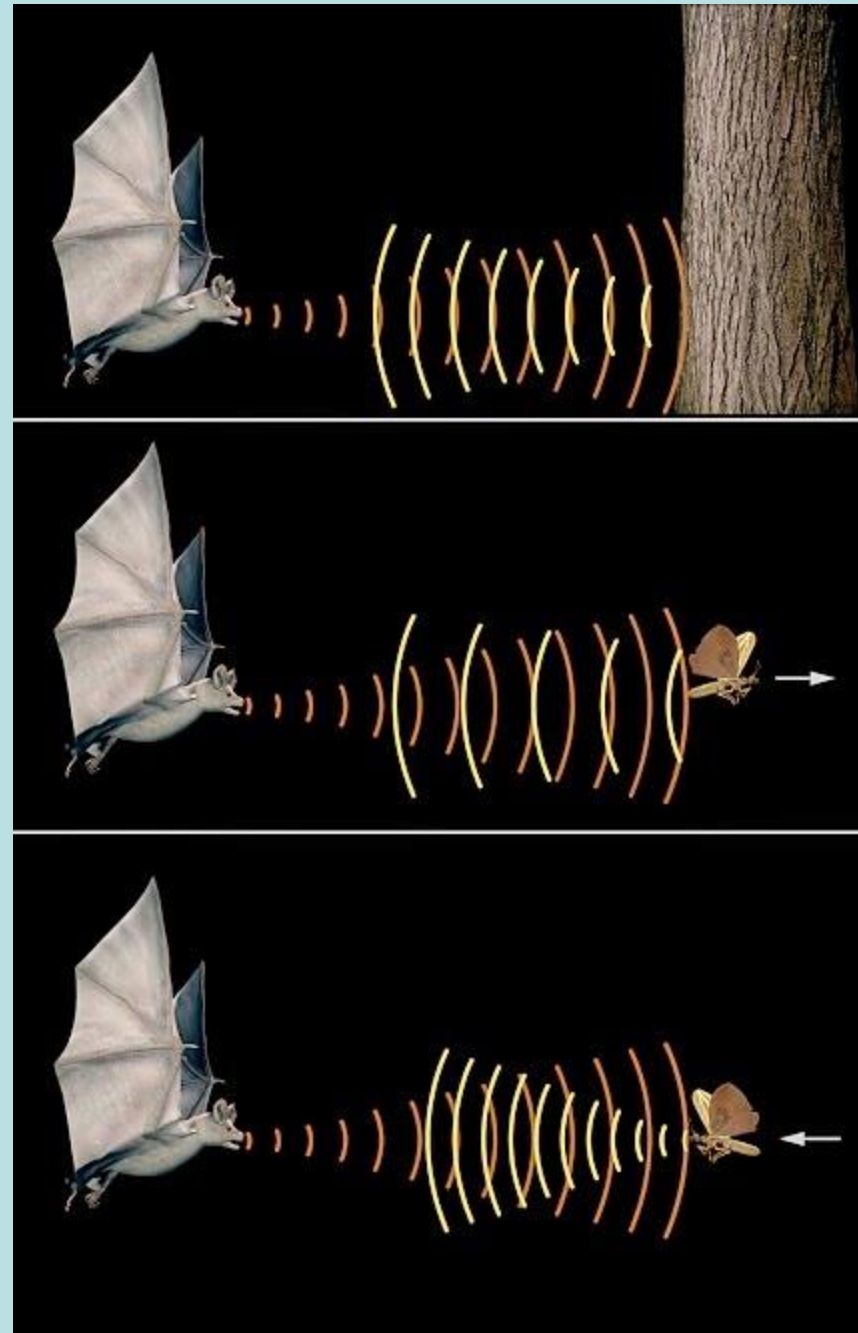
Акустичний ефект Доплера – це зміна висоти тону звуку, що має місце при відносному русі приймача і джерела.

Оптичний ефект Доплера – це зміна частоти хвилі, що сприймаються приймачем.

Ефект Доплера використовують:

1) в радіолокації для:

- розпізнавання рухомих об'єктів, наприклад, літаків, на фоні нерухомих (гір, хмар),
- для вимірювання швидкостей літальних апаратів, кораблів, автомобілів, а також інших об'єктів, а також у деяких видах спорту,



Ефект Доплера використовують:

2) в неінвазивному вимірюванні швидкості потоку – без безпосереднього розміщення датчиків у потоці, за рахунок розсіювання ультразвуку на неоднорідностях середовища, як частинках суспензії, бульбашках газу, для визначення швидкості гідрометеорів (наприклад, хмар), морських і річкових течій,

3) в космонавтиці та астрономії для визначення параметрів руху космічних апаратів, планет та зірок, за червоним зміщенням світла від астрономічних об'єктів, вимірюється їхня швидкість і розраховується відстань до них (результати цих досліджень дозволяють стверджувати, що Всесвіт розширюється). Зміна довжин хвиль світлових коливань призводить до того, що всі спектральні лінії в спектрі джерела зміщуються в бік довгих хвиль, якщо променева швидкість його спрямована від спостерігача (червоне зміщення), і в сторону коротких, якщо напрямок променевої швидкості – до спостерігача (фіолетове зміщення),

Ефект Доплера використовують:

4) в датчиках руху в автосигналізаціях, системах охорони, автоматичному вмиканні освітлення, відоезйомки, системах «розумний будинок»,

5) для визначення координат у супутниковій системі Коспас-Сарсат – міжнародній супутниковій пошуково-рятувальній системі, розробленій задля сповіщення про аварії й місцеположення персональних радіобуїв та радіобуїв, встановлених на суднах і літаках на випадок аварійних ситуацій,

6) в електроніці для створення електромагнітних хвиль високої частоти, навіть рентгенівського діапазону, у лазерах на вільних електронах,

7) у медицині в комп'ютерних комплексах ультразвукової доплерографії: ультразвук, потрапляючи на еритроцити, які знаходяться у артерії або венах, посиляє з кожної ділянки судини відбитий звук різної частоти. Сигнал перетворюючись дає інформацію про параметри кровообігу.

6. Потік енергії хвилі

Повна енергія хвилі у виділеному об'ємі середовища:

$$E_{нов} = E_k + E_n = \rho \Delta V \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t - kx).$$

Об'ємна густина енергії

$$\varpi = \frac{E_{нов}}{\Delta V} = \rho \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t - kx),$$

а враховуючи, що квадрат синуса за період має середнє значення $1/2$, то середнє значення густини енергії за часом

$$\langle \varpi \rangle = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2.$$

Потоком енергії називається енергія, що переноситься хвилею через деяку поверхню S у перпендикулярному до неї напрямі за одиницю часу:

$$\Phi = \langle \varpi \rangle S \nu.$$

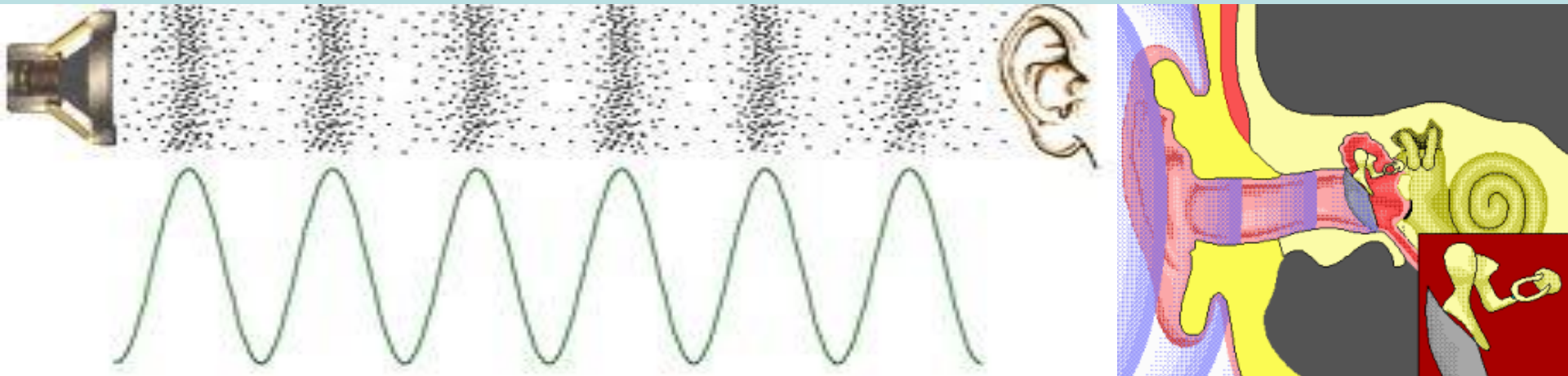
Густиною потоку енергії називається енергія, що переноситься через одиницю площі поверхні за одиницю часу:

$$\langle \mathbf{j} \rangle = \langle \varpi \rangle \nu \quad - \text{вектор Умова.}$$

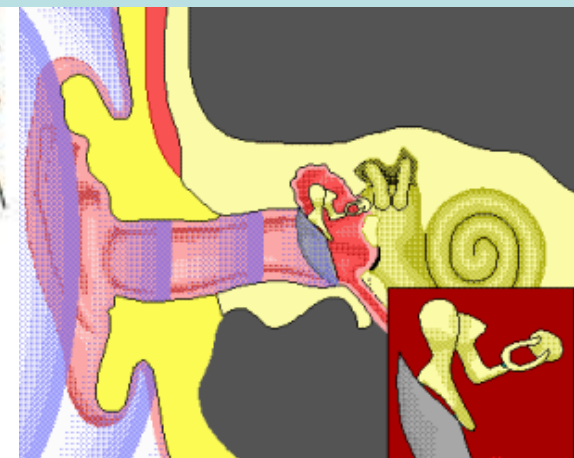
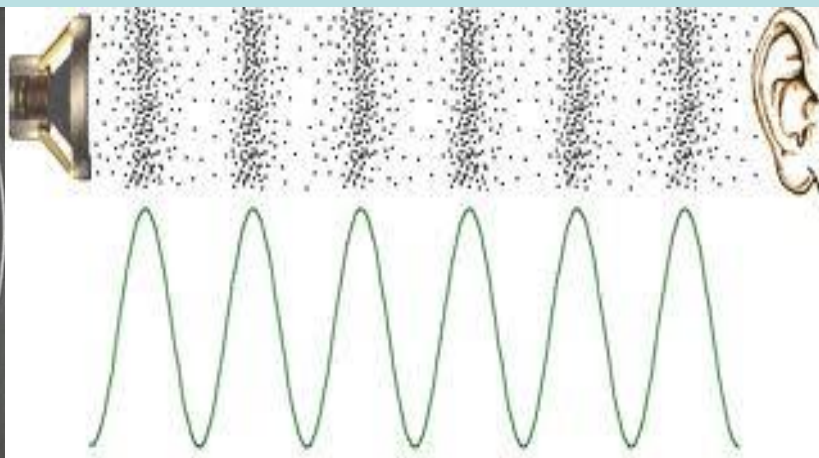
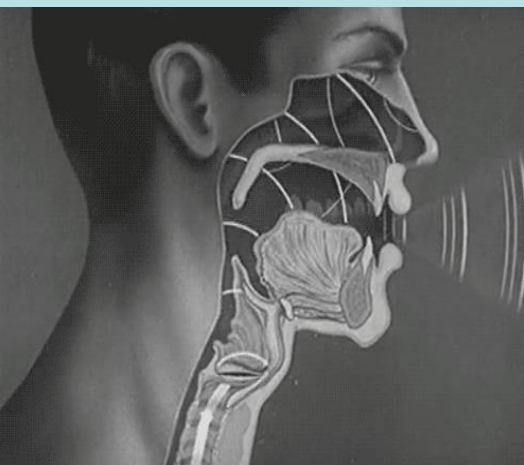
Вектор Умова характеризує перенесення енергії хвилею в різних точках простору.

7. Звукові хвилі, їх основні характеристики. Ультразвук. Область чутності. Акустика приміщень та споруд

Процес поширення у просторі коливань частинок суцільного пружного середовища, яке неперервно розподілене у просторі, *називають механічною (пружньою) хвилею.*



Деформація, що виникає у деякому місці, спричинює першопочаткове відхилення частинок середовища від положення рівноваги, а наявність між частинками середовища сил пружності зумовлює процес передачі коливального стану від одних частинок до інших. При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається лише стан коливального руху і його енергія.

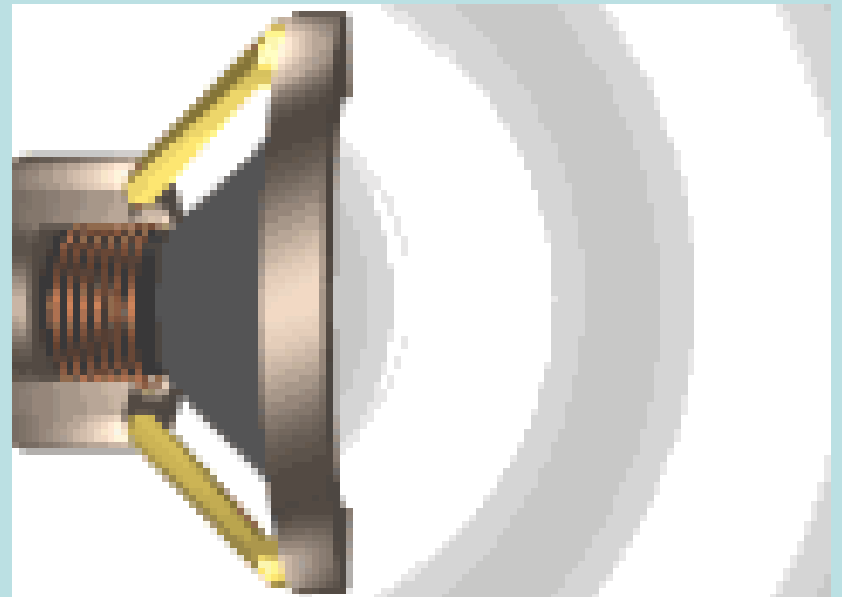
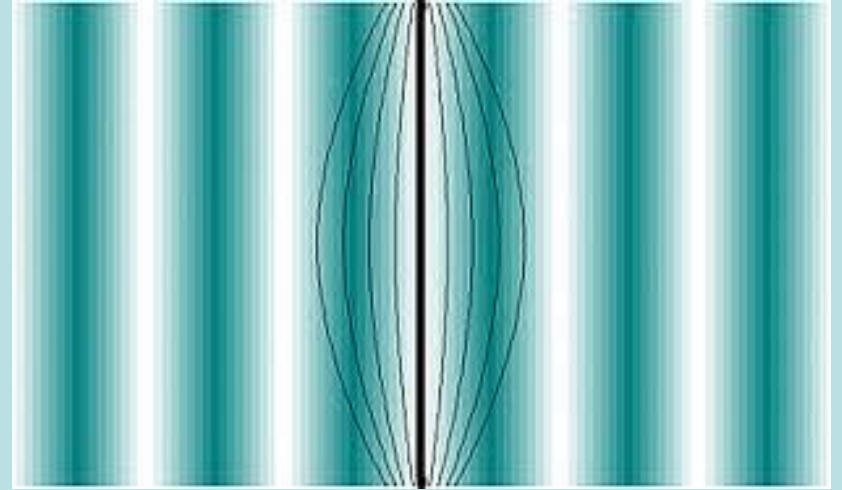


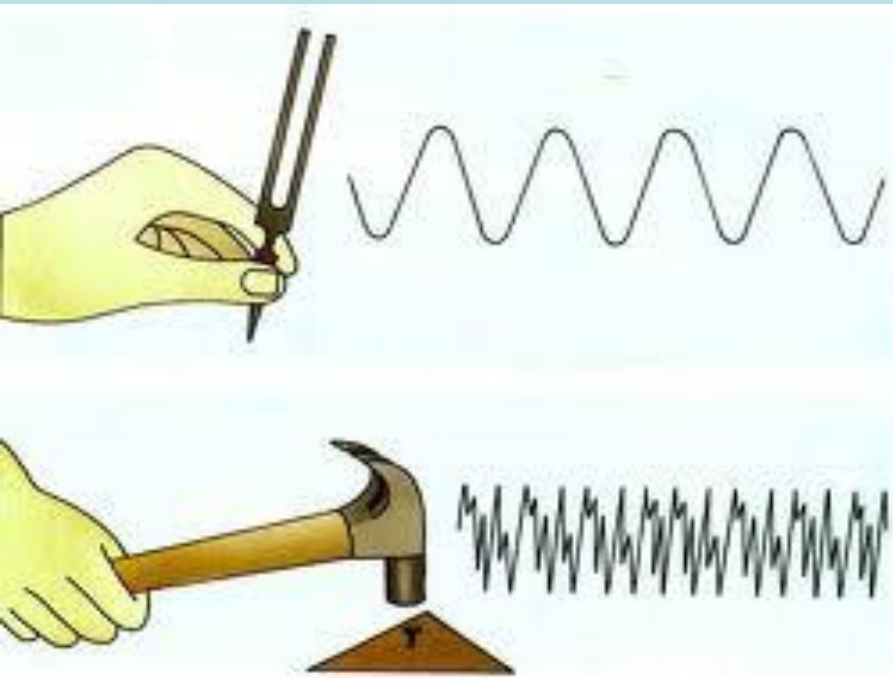
Звукові хвилі – це пружні хвилі, що поширюються у суцільних середовищах і частоти яких лежать у межах від 16 Гц до 20000 Гц.

Джерелом звуку може бути будь яке тіло, що коливається у пружному середовищі з частотою звуку.

Здійснюючи коливання, тіло викликає коливання частинок середовища, що прилягають до нього.

Стан коливального руху послідовно передається до все більш віддалених від тіла частинок середовища, тобто у середовищі поширюється хвиля з частотою коливань її джерела.







Інфразвуком називають пружні хвилі, частоти яких менші 16 Гц.

Інфразвукові хвилі виникають внаслідок обдування вітром будівель, дерев; під час руху людини, тварин, транспорту; при роботі різних механізмів; при грозових розрядах, вибухах бомб, пострілах гармат. У земній корі спостерігають коливання і вібрації інфразвукових частот внаслідок обвалів, руху різних видів транспорту, вулканічних вивержень тощо.



Такі звуки людина скоріше відчуває, ніж чує. Річ у тому, що деякі внутрішні органи людини мають власну частоту коливань 6–8 Гц. При дії інфразвуку цієї частоти можливе виникнення резонансу коливань цих органів, що викликає неприємні відчуття, біль.



Властивість інфразвукових хвиль поширюватись на великі відстані лежить в основі таких наук, як сейсмологія і океанологія, які займаються вивченням і дослідженням внутрішньої будови Землі та передбаченням землетрусів, наближенням цунамі тощо.



Ультразвуком називають хвилі частоти яких лежать у межах $2 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$ Гц.

20 Гц – 20000 Гц



Ультразвук широко застосовується у різних галузях знань. Різноманітність застосувань ультразвуку умовно поділяють на три напрямки:

- 1. одержання інформації,*
- 2. вплив на речовину ,*
- 3. обробка і передача сигналів.*

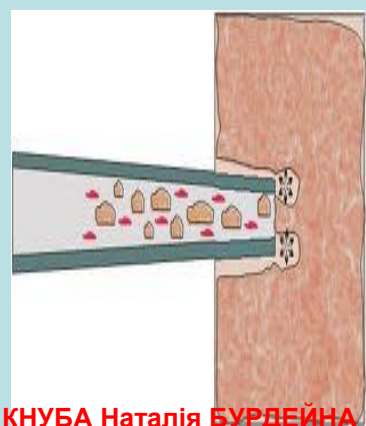
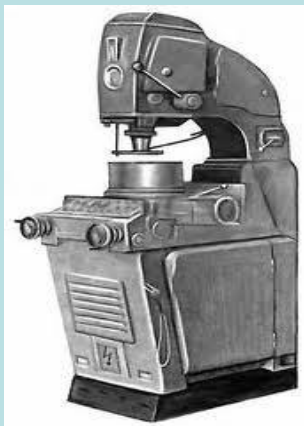
1) *Одержання інформації* за допомогою ультразвукових методів застосовують для вивчення властивостей і будови речовини, для з'ясування процесів, що в них відбуваються на макро- і мікрорівнях, допомагають з'ясувати особливості молекулярної структури речовини, перевірити припущення про структурні моделі, дають інформацію про особливості будови кристалічної ґратки, визначають пружні характеристики та міцність металевих матеріалів, кераміки, полімерів, ступінь їхньої чистоти, наявність домішок; дають можливість здійснювати ультразвукову локацію:



- застосовують у гідроакустиці для сигналізації і локації під водою;
- застосовують в ультразвуковій дефектоскопії (за допомогою якої виявляють дефекти у матеріалах, виробках, конструкціях, будівлях);
- використовують для дослідження структури частин живих організмів, для діагностики деяких захворювань.



- 2) Оскільки ультразвукові пучки можуть мати значні інтенсивності, то їх *вплив на речовину* досить активний:
- дія ультразвукових коливань безпосередньо на розплави дає можливість одержати розплави більш однорідної і дрібнокристалічної структури;
 - ультразвукова кавітація використовується для очищення від забруднень поверхонь деталей (годинникове виробництво, приладобудування, електронна техніка, ремонт машин, наприклад, явище кавітації використовують для очищення форсунок інжекторів);
 - кавітаційні ударні хвилі можуть диспергувати тверді тіла і рідини, утворюючи емульсії і суспензії (використовується у хімічній і медичній промисловості, а також при пранні для видалення сильних забруднень);



- ультразвуковий капілярний ефект полягає у збільшенні у десятки разів швидкості і висоти підйому рідини у капілярах під дією ультразвукового випромінювання;
- ультразвукове випромінювання значно впливає на швидкість сушки будівельних матеріалів;
- при дії ультразвуку на біологічні об'єкти відбувається поглинання і перетворення енергії звуку в теплову енергію. Локальне нагрівання тканин на частки і одиниці градусів сприяє життєдіяльності біологічного об'єкта, підвищує інтенсивність обміну речовин, проте при більш інтенсивному опромінюванні ультразвуком біологічний об'єкт зазнаватиме руйнування. У медицині ультразвук використовується для діагностики, терапевтичного і хірургічного лікування.



3) *Обробка і передача сигналів* за допомогою ультразвукових пристроїв застосовують у радіолокації, обчислювальній техніці та для керування світловими сигналами в оптиці й електроніці.



Акустика – розділ фізики, в якому вивчають процеси збудження, поширення, сприймання та взаємодії звукових хвиль із речовиною середовища.

Розрізняють фізичні та психофізичні параметри звуку.

Фізичні параметри звуку

1) *частота звуку, що сприймає людське вухо*

$$\nu = 16 \div 20000 \text{Гц}$$

Психофізичні параметри звуку

1) *висота звуку* – якість звуку, що сприймається людиною суб'єктивно на слух і залежить від частоти звуку: *із збільшенням частоти висота звуку зростає*



НИЗЬКА ЧАСТОТА – НИЗЬКА НОТА



ВИСОКА ЧАСТОТА – ВИСОКА НОТА



Фізичні параметри звуку

2) *інтенсивність звуку* (або *сила звуку*) – величина, яку визначають середньою енергією, що переносить звукова хвиля за одиницю часу через одиничну площадку, перпендикулярну напрямку поширення хвилі:

$$I = \frac{W}{St}, [I] = \frac{Вт}{м^2 с}$$

Психофізичні параметри звуку

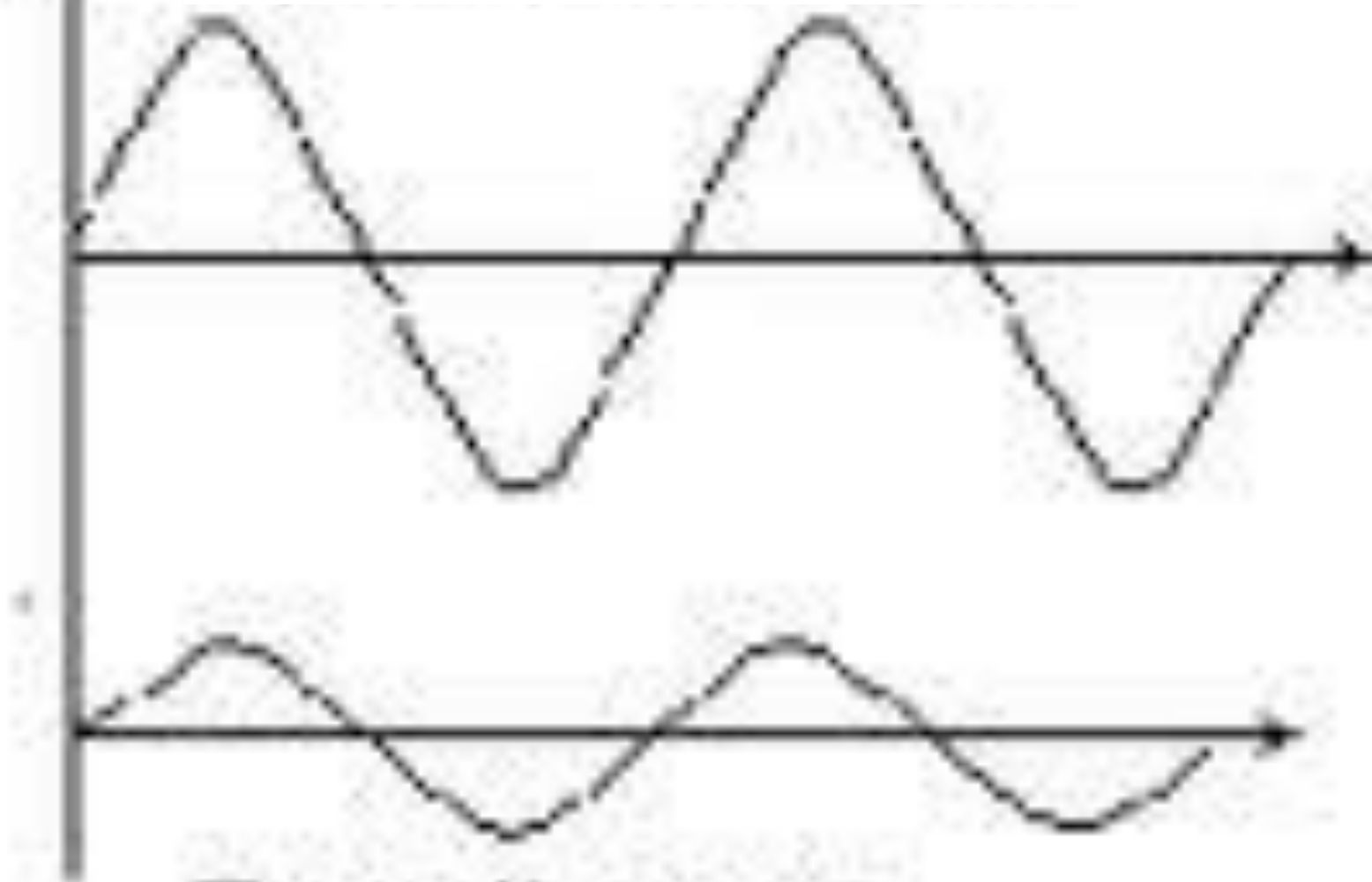
2) *гучність звуку* – суб'єктивна характеристика звуку, пов'язана з його інтенсивністю:

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \text{ – закон Вебера-Фехнера,}$$

де I_0 – інтенсивність звуку на порозі чутності ($= 10^{-12}$ Вт/м²)

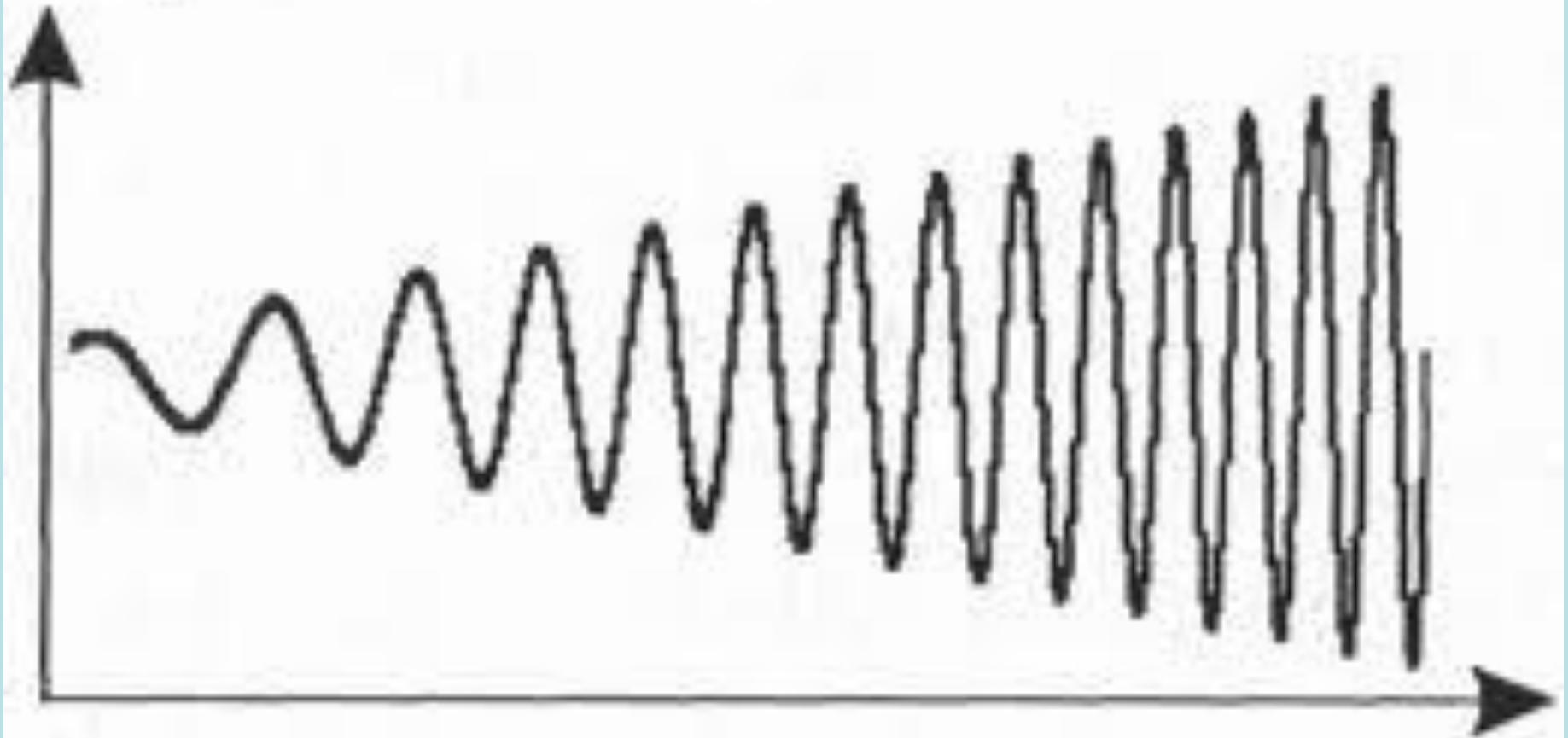
X

Голосний звук



Тихий звук

Гучність



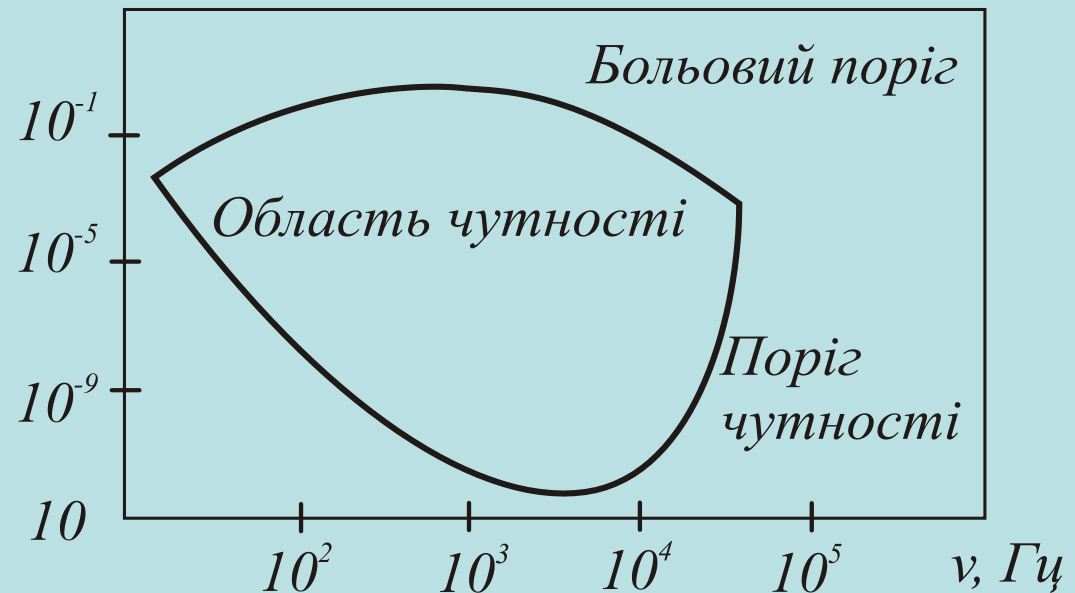
**Низький
звук**

**Високий
звук**

Чуттєвість людського вуха різна для різних частот. Для того, щоб викликати звукове відчуття, хвиля повинна мати якусь мінімальну інтенсивність. Але якщо ця інтенсивність переважає певну границю, то людина не чує звук, а відчуває лише больове відчуття.

Для хвилі кожної частоти існує найменша (*порог чутності*) і найбільша (*больовий поріг*) інтенсивність звуку, здатна викликати звукове сприйняття. Область, що знаходиться між цими двома кривими, називається *областю чутності*.

$I, \text{Вт/м}^2$



Фізичні параметри звуку

3) реальний звук являє собою *акустичний спектр* – результат накладання гармонічних коливань з великим спектром частот.

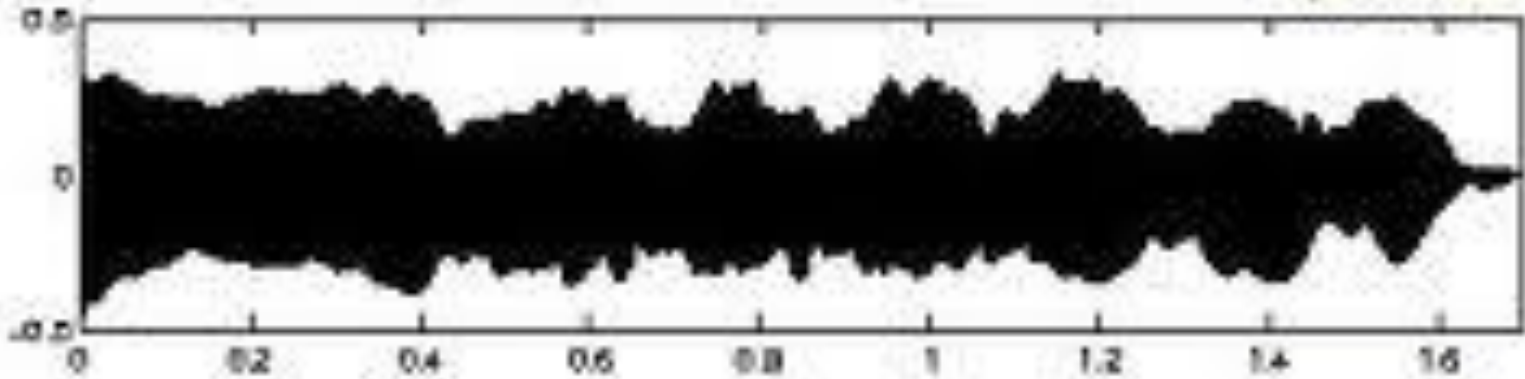
Психофізичні параметри звуку

3) *тембр звуку* – своєрідне звукове відчуття, яке характеризується акустичним спектром і розподілом енергії між певними частотами.

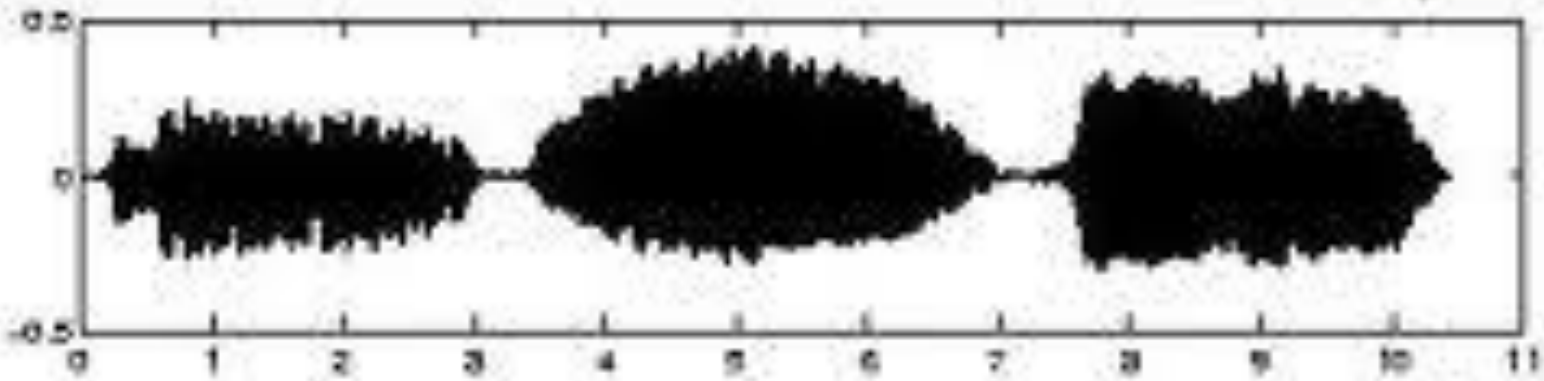
Так різні співаки, що беруть одну й ту ж ноту, мають різний акустичний спектр – різний тембр



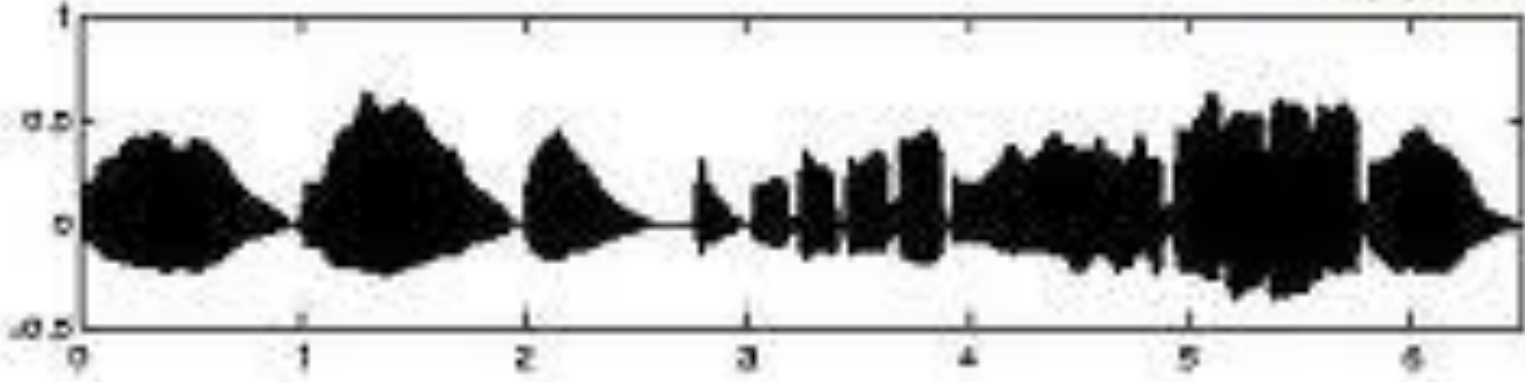
флейта



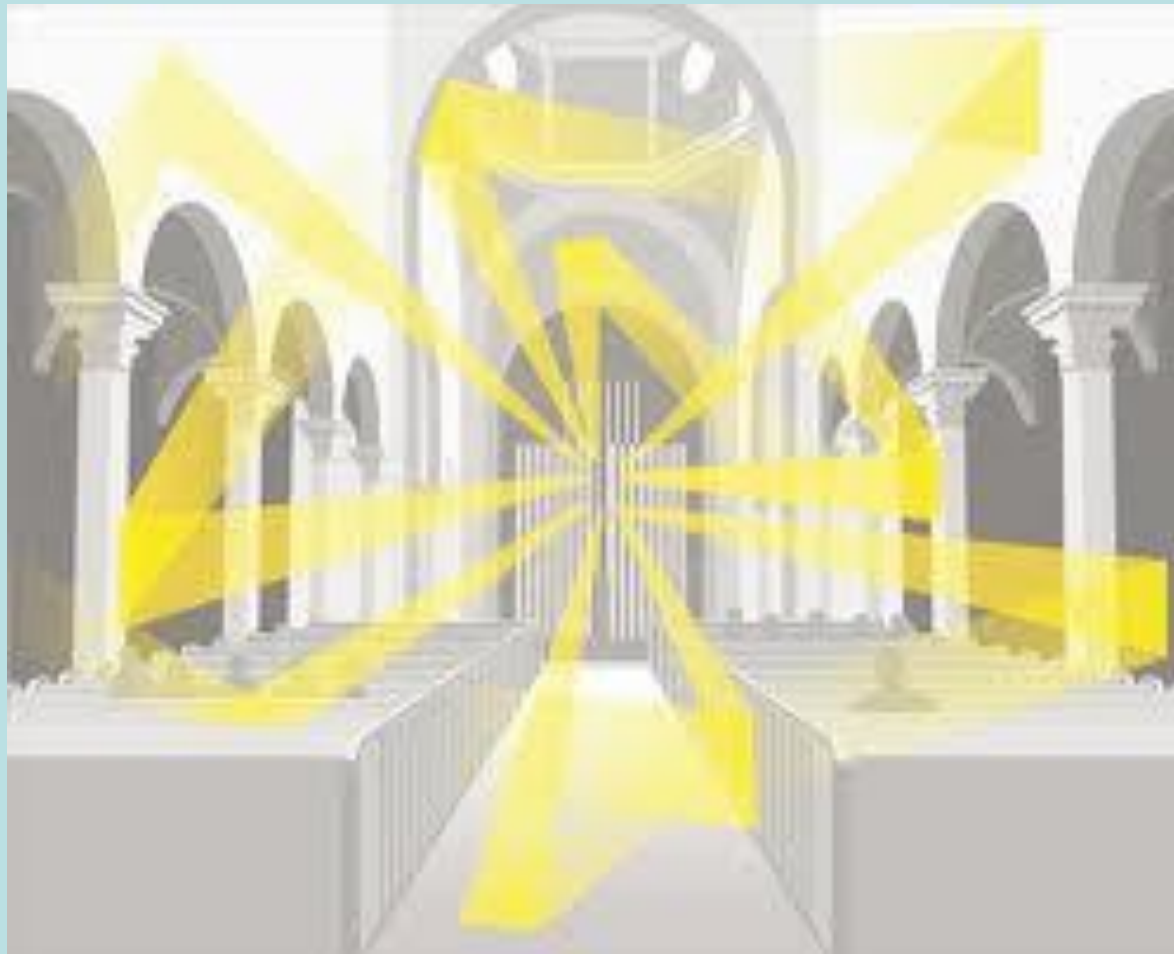
саксофон



труба

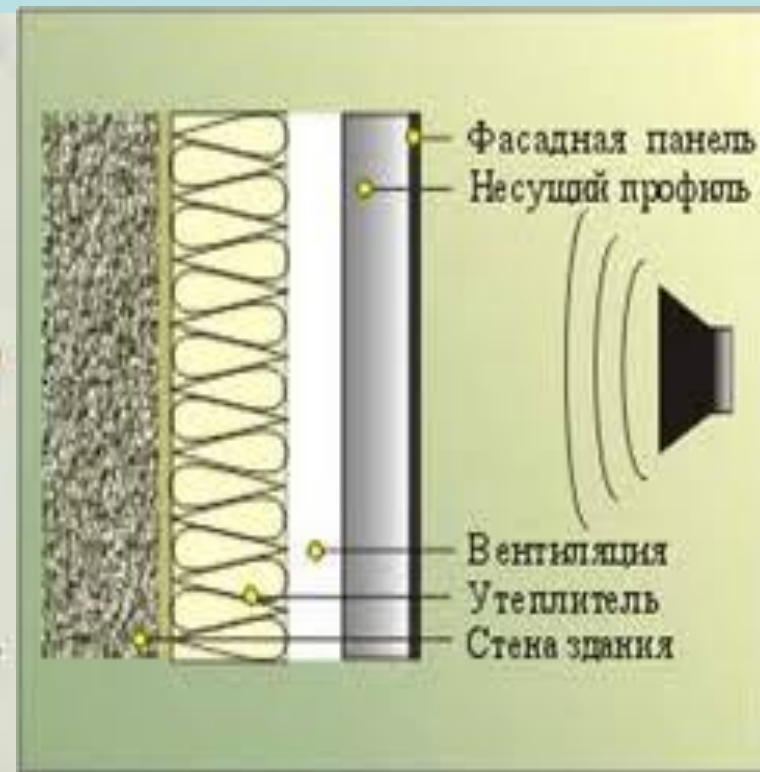
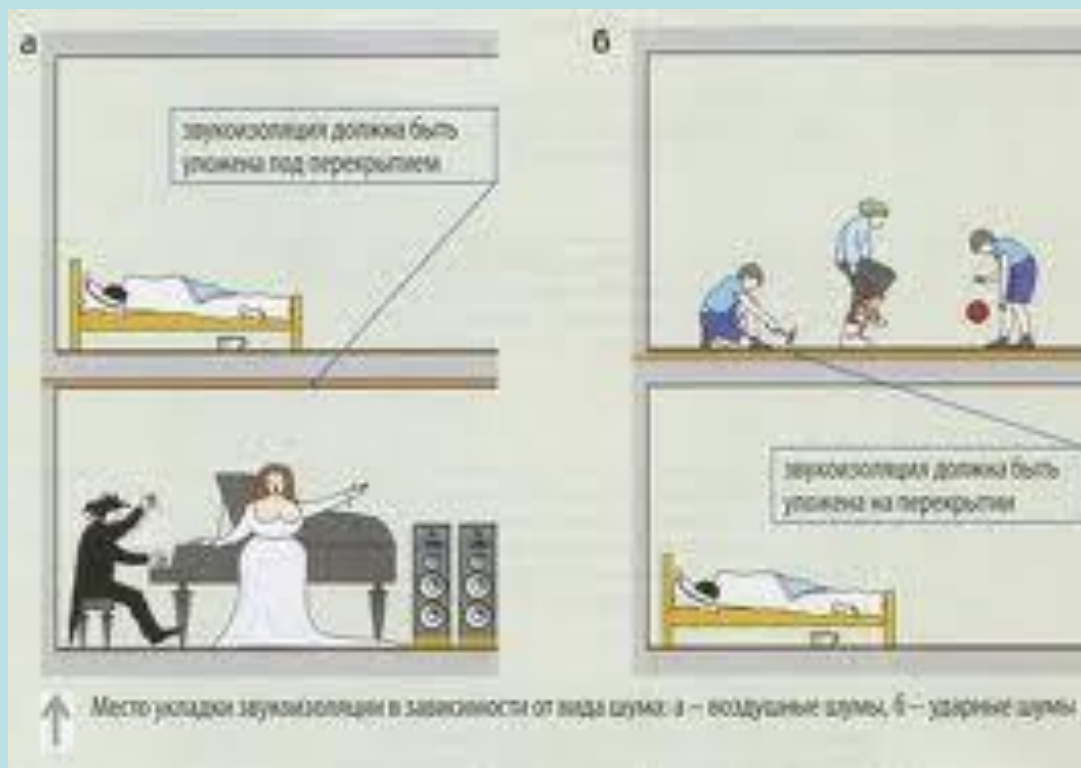


Для акустики приміщень велике значення має *реверберація звуку* – процес поступового згасання звуку в закритих приміщеннях після вимкнення його джерела.



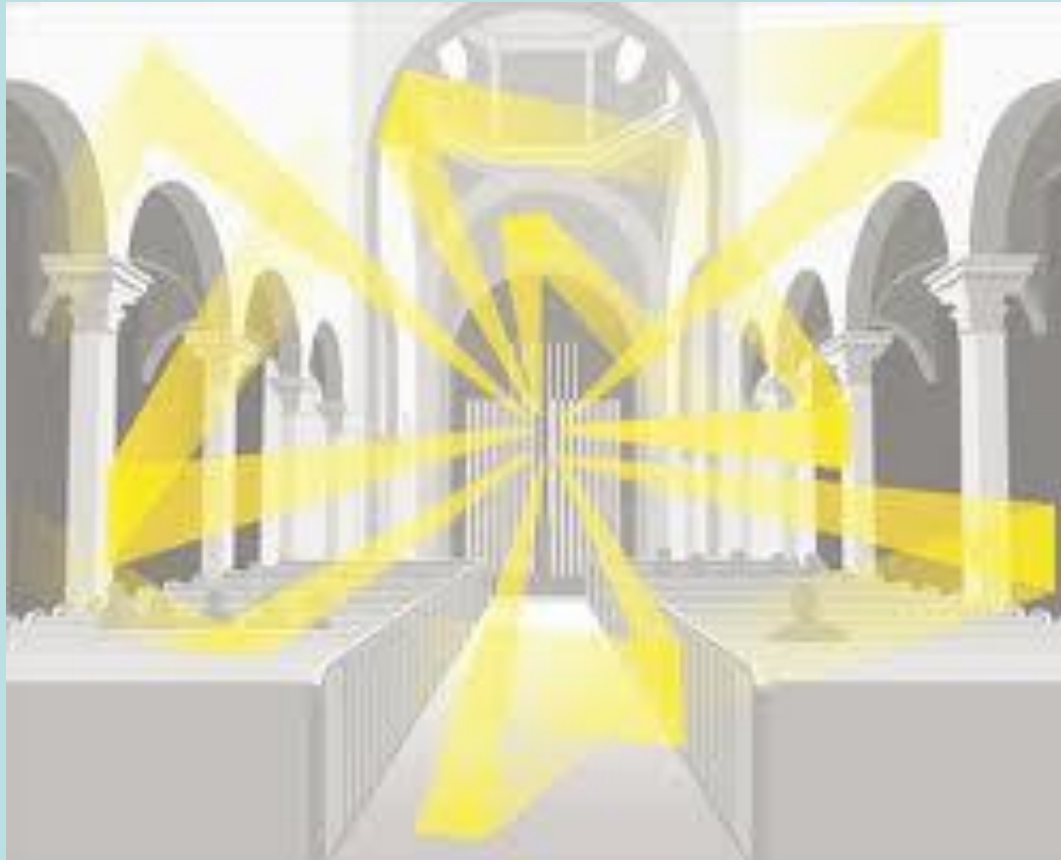
Якщо приміщення пусті, то відбувається повільне згасання звуку і створюється «гучність» приміщення.

Якщо звуки згасають швидко (при застосуванні звукопоглинаючих матеріалів), то вони сприймаються приглушеними.



Час реверберації – час, протягом якого інтенсивність звуку в приміщенні послаблюється в мільйон разів, а його рівень – на 60 дБ.

Час реверберації – важлива характеристика акустичних властивостей концертних залів, кінозалів, аудиторій та ін.



Приміщення має гарну акустику, якщо час реверберації складає 0,5–1,5 с.

При великому часі реверберації мова і музика звучать досить голосно, але не виразно, при малому – слабо і глухо. Тому в кожному конкретному випадку намагаються досягти оптимальних акустичних характеристик приміщення.



Прикладною галуззю акустики є *будівельна акустика* – наукова дисципліна, що вивчає питання захисту приміщень, будівель і територій населених пунктів від шуму архітектурно-планувальними і будівельно-акустичними (конструктивними) методами.

У результаті хаотичного і безладного змішування звуків утворюються шуми, які негативно впливають на нервову систему людини.

Шуми розділяють на повітряні і структурні.

Повітряні шуми утворюються в результаті вібрацій систем, які викликають звукові хвилі у вигляді коливань повітря.

Структурні шуми утворюються в результаті вібрацій, які передаються через стіни, підлогу, стелі, труби центрального опалення від коливально-ударних процесів, що здійснюються у сусідніх приміщеннях.

Звуковий дискомфорт у приміщеннях виникає через:

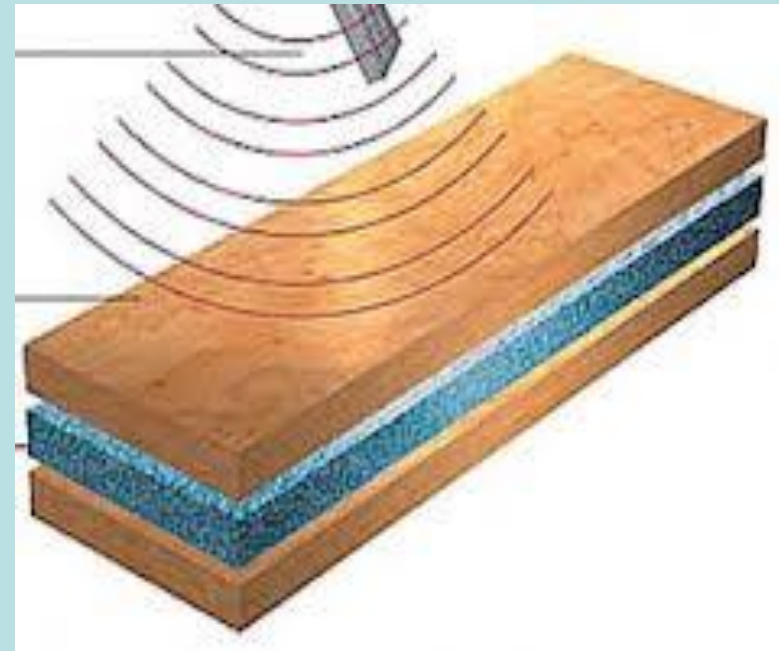
1.неправильний вибір будівельно-оздоблювальних матеріалів;

2.неправильну форму приміщень, що може викликати такі небажані звукові ефекти, як «стояча хвиля» – явище підсилення або послаблення звуку в деяких місцях кімнати, що часто виникає у приміщеннях, які мають форму прямокутного «пеналу», «порхаюче відлуння» – явище, яке виникає між паралельними стінами, «звуковий відскок» – явище відбиття звуку від двох-трьох поверхонь, які сходяться в одному куті.

До архітектурно-планувальних методів захисту від шуму відносять раціональні об'ємно-планувальні рішення будівель і приміщень; віддалення джерел шуму від захисних об'єктів; оптимальне планування мікрорайонів, житлових районів, а також територій промислових підприємств.

Будівельно-акустичні методи включають використання конструкцій і пристроїв, що забезпечують ефективне зниження шуму шляхом звукопоглинання і звукоізоляції.

Задача звукопоглинання – прибирання шумів у тому приміщенні, в якому вони виникли, через оздоблювання матеріалами, що мають поглинати шуми, не відбиваючи їх назад у приміщення. **Задача ж звукоізоляції** – перешкоджання проходженню шумів через стіни будівель і приміщення.



Лекція 8

ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ

1. Загальні закономірності хвильових процесів. Поздовжні та поперечні хвилі.
2. Рівняння гармонічної хвилі, диференціальне хвильове рівняння.
3. Поширення хвиль у середовищах із дисперсією. Швидкість механічних хвиль в газах, рідинах та твердих тілах.
4. Інтерференція механічних хвиль.
5. Стоячі хвилі.
6. Потік енергії хвилі.
7. Звукові хвилі, їх основні характеристики. Ультразвук. Область чутності. Акустика приміщень та споруд.