

# Wykłady z Fizyki 02



Zbigniew Osiak

**Akustyka**

## **ORCID**

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

## **OZNACZENIA**

**B** – notka biograficzna

**C** – ciekawostka

**D** – propozycja wykonania doświadczenia

**H** – informacja dotycząca historii fizyki

**I** – adres strony internetowej

**K** – komentarz

**P** – przykład

**U** – uwaga

**Zbigniew Osiak** (Tekst)

**WYKŁADY Z FIZYKI**  
Akustyka

**Małgorzata Osiak** (Ilustracje)

© Copyright 2013 by  
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.  
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji  
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej  
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3886-3

e-mail: [zbigniew.osiak@gmail.com](mailto:zbigniew.osiak@gmail.com)

“*Wykłady z Fizyki – Akustyka*” są drugim z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem drugiego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

- 
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

# Fale mechaniczne

**dr Zbigniew Osiak**

Rysunki wykonała

**Małgorzata Osiak**

- Fala mechaniczna 09
- Ciśnienie akustyczne 10
- Czoło fali 11
- Fala podłużna 12
- Fala poprzeczna 13
- Amplituda fali 14
- Długość fali 15
- Okres fali 16
- Częstotliwość fali 17
- Prędkość fali 18
- Faza fali 19
- Fala płaska 21
- Fala kulista 22



- 
- Fala mechaniczna  $\Leftrightarrow$  rozchodzące się zaburzenie ośrodka sprężystego spowodowane przekazaniem drgań elementu ośrodka wytrąconego z położenia równowagi sąsiednim warstwom.
  - Propagacji zaburzeń nie towarzyszy ruch ośrodka jako całości.

- 
- Ciśnienie akustyczne  $\Leftrightarrow$  zmiana ciśnienia w danym punkcie ośrodka spowodowana propagacją fali mechanicznej.

- 
- Czoło fali  $\Leftrightarrow$  powierzchnia graniczna, do której dotarła fala.
  - Powiadamy, że wszystkim punktom czoła fali odpowiada taka sama faza fali.

- 
- Fala podłużna  $\Leftrightarrow$  fala, w której drgania zachodzą w kierunku jej propagacji.

- 
- Fala poprzeczna  $\Leftrightarrow$  fala, w której drgania zachodzą prostopadle do kierunku jej propagacji.

- 
- Amplituda fali  $\Leftrightarrow$  maksymalna wartość zmiany wielkości, której drgania rozchodzą się ruchem falowym, liczona względem niezaburzonej (równowagowej) wartości tej wielkości.

- Długość fali ( $\lambda$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna podawana w metrach [m] będąca odległością mierzoną wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali między dwoma najbliższymi sobie położonymi punktami, którym odpowiadają takie same fazy fali.

- 
- Okres fali (T)  $\Leftrightarrow$  czas w jakim czoło fali przebywa odległość równą długości fali.



- Częstotliwość fali ( $f$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna mierzona w hercach będącą odwrotnością okresu fali ( $T$ ).

$$f = \frac{1}{T}, \quad [f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

- Częstotliwość fali jest równa częstotliwości drgań źródła.

- Prędkość fali  $\Leftrightarrow$  prędkość z jaką porusza się czoło tej fali.

$$v = \lambda f$$

- $\lambda$  – długość fali
- $f$  – częstotliwość fali
- Wartość prędkości fali rozchodzącej się w danym ośrodku zależy od własności tego ośrodka.

- Faza fali  $\Leftrightarrow$  kąt, mierzony w radianach, określony jako:

$$\alpha = \frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft + \alpha_0$$

- $f$  – częstotliwość fali
- $\alpha$  – długość fali
- $\alpha_0$  – początkowa faza fali
- $x$  – odległość od źródła fali
- $t$  – czas rozchodzenia się fali

- Powiadamy, że dwie fale o jednakowych częstotliwościach, długościach i fazach początkowych mają **zgodne fazy**, jeżeli różnica ich faz wynosi:

$$\Delta\alpha = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

oraz **przeciwne fazy**, jeżeli różnica ich faz wynosi:

$$\Delta\alpha = (2n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

- Fala płaska  $\Leftrightarrow$  fala, której czołem jest płaszczyzna. Propagację fali płaskiej opisuje równanie

$$\Delta y = (\Delta y)_{\max} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft + \alpha_0\right)$$

$\Delta y$  – zmiana wartości wielkości, której drgania rozchodzą się ruchem falowym, liczna względem nie zaburzonej (równowagowej) wartości tej wielkości

$(\Delta y)_{\max}$  – amplituda fali

$\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft + \alpha_0 =$  faza fali

- 
- Fala kulista  $\Leftrightarrow$  fala, której czoło jest sferą. Źródłem fal kulistych są punktowe źródła drgań.
  - Falę kulistą daleko od jej źródła można w przybliżeniu traktować w małym obszarze jako falę płaską.

## Wykład 6

---

# Akustyka

**dr Zbigniew Osiak**

Rysunki wykonała

**Małgorzata Osiak**

- 
- Dźwięk jako fala mechaniczna 25
  - Podział dźwięków ze względu na częstotliwość 31
  - Wpływ ultradźwięków i infradźwięków na organizm 39
  - Natężenie, poziom natężenia 42
  - Tony harmoniczne 47
  - Cechy dźwięku 54
  - Zjawiska związane z dźwiękiem 62
  - Fale stojące 82



- Akustyka 26
- Fale akustyczne 27
- Prędkość dźwięku w różnych ośrodkach 28

- 
- Akustyka  $\Leftrightarrow$  dział fizyki zajmujący się badaniem fal akustycznych (dźwięków).

- 
- Fale akustyczne  $\Leftrightarrow$  podłużne fale mechaniczne rozchodzące się w gazach, cieczech i ciałach stałych.
  - Propagacja fal akustycznych polega na przekazywaniu drgań cząsteczek ośrodka sąsiednim cząsteczkom, towarzyszą temu lokalne zmiany gęstości i ciśnienia.
  - Fale akustyczne są nazywane również falami dźwiękowymi lub krótko dźwiękami.

- Prędkość dźwięku w różnych ośrodkach  $\Leftrightarrow$  wartość prędkości dźwięku ( $v$ ) w ośrodku o gęstości ( $\rho$ ) można wyznaczyć z relacji:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- dla ciał stałych o module Younga ( $E$ )

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

- dla cieczy i gazów o module sprężystości objętościowej ( $K$ )

- W gazach doskonałych:
- dla dźwięków niskich traktowanych jako proces izotermiczny

$$K = p$$

- dla dźwięków wysokich traktowanych jako proces adiabatyczny

$$K = \kappa p$$

- $p$  – ciśnienie
- $\kappa$  – wykładnik adiabaty

- Przykładowe wartości prędkości dźwięku w różnych ośrodkach przy ciśnieniu jednej atmosfery i temperaturze 20<sup>0</sup> C zestawione są w tabelce.

ośrodek	prędkość dźwięku
powietrze	343,8 m/s
woda (25 <sup>0</sup> C)	1497 m/s
żelazo	5100 m/s

- Infradźwięki 32
- Dźwięki słyszalne 34
- Ultradźwięki 35
- Kawitacja 37
- Hiperdźwięki 38

- Infradźwięki  $\Leftrightarrow$  podłużne fale mechaniczne o częstotliwościach mniejszych niż 16 Hz.
- Infradźwięki nie są słyszane przez człowieka.
- Źródłem infradźwięków mogą być między innymi sprężarki, głośniki niskotonowe, tektoniczne ruchy Ziemi, wyładowania atmosferyczne oraz kołyszące się konary dużych drzew.
- Infradźwięki mogą rozchodzić się na bardzo duże odległości, ponieważ są bardzo słabo pochłaniane.
- Infradźwięki są niebezpieczne dla człowieka, ponieważ mogą wywoływać rezonansowy wzrost amplitudy drgań narządów takich jak serce i płuca.



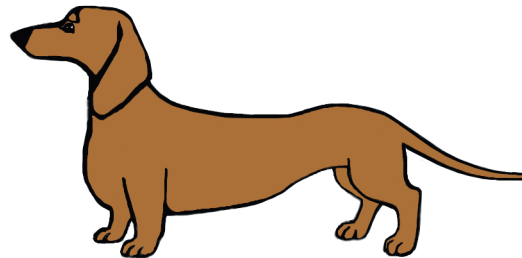
- Niektóre zwierzęta, jak na przykład szczury, słyszą infradźwięki. Uciekanie tych zwierząt, z zajmowanego przez nie terytorium, może zwiastować zbliżające się trzęsienie Ziemi lub katastrofę budowlaną.



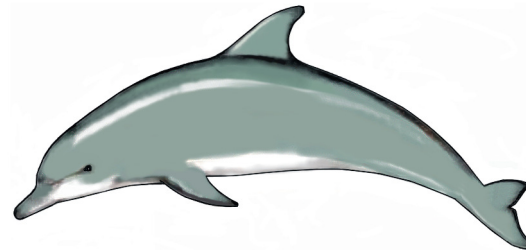
- 
- Dźwięki słyszalne  $\Leftrightarrow$  dźwięki o częstotliwościach z przedziału od 16 Hz do 20 kHz, które może słyszeć człowiek.
  - Najlepiej słyszemy dźwięki o częstotliwości około 3000 Hz, ponieważ tej częstotliwości odpowiada najmniejszy próg słyszalności.
  - Sygnały alarmowe powinny posiadać częstotliwości około 3000 Hz.

- 
- Ultradźwięki  $\Leftrightarrow$  podłużne fale mechaniczne o częstotliwościach z przedziału od 20 kHz do 1GHz.
  - Ultradźwięki nie są słyszane przez człowieka.
  - Wytwarzanie ultradźwięków jest możliwe dzięki wykorzystaniu zjawisk elektrostrykcji i magnetostrykcji.
  - Ultradźwięki znalazły zastosowanie między innymi w wielu procesach technologicznych, badaniach struktury materiałów, echolokacji oraz terapii i diagnostyce medycznej.

- Niektóre zwierzęta, jak na przykład psy, słyszą ultradźwięki, co jest niezwykle przydatne przy ich tresurze.



- Nietoperze i delfiny potrafią wytwarzać i odbierać ultradźwięki, wykorzystując je do echolokacji.



- Kawitacja  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na gwałtownym przejściu fazy ciekłej w fazę gazową, spowodowanym obniżeniem ciśnienia.  
W wyniku kawitacji powstają w cieczy pęcherzyki wypełnione parą.  
Okresowe obniżenie ciśnienia w cieczy można uzyskać, umieszczając ją w polu ultradźwięków.

- Hiperdźwięki  $\Leftrightarrow$  podłużne fale mechaniczne o częstotliwościach większych niż 1 GHz.
- Hiperdźwięki nie są słyszane przez człowieka.
- Wytwarzanie hiperdźwięków jest możliwe dzięki wykorzystaniu zjawiska elektrostrykcji w zmiennych polach elektrycznych o częstotliwościach mikrofalowych.
- Propagacja hiperdźwięków może zachodzić tylko w ośrodkach, w których odległości między atomami (cząsteczkami) są niewiększe od długości fali hiperdźwiękowej.

- Działanie ultradźwięków 40
- Działanie infradźwięków 41

- Efekt mechaniczny:
  - zjawisko kawitacji
  - zjawisko tyksotropowe (przechodzenie żelu w zol)
- Efekt cieplny – wzrost temperatury
- Efekt chemiczny:
  - przyspieszenie niektórych reakcji chemicznych
  - rozpad niektórych białek
  - wzrost dyfuzji przez błony półprzepuszczalne



- Infradźwięki mogą:
  - powodować bóle głowy, mdłości, bezsenność, nerwice,
  - wywoływać wibracje narządów.
- Zabezpieczenie się przed infradźwiękami jest trudne ze względu na ich dużą przenikliwość.

- Natężenie dźwięku 43
- Poziom natężenia dźwięku 44
- Próg słyszalności 45
- Próg bólu 46

- Natężenie dźwięku (I)  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna mierzona w watach na metr kwadratowy określona jako

$$I = \frac{E}{St}, \quad [I] = \frac{W}{m^2}$$

- E – energia przenoszona przez falę dźwiękową przechodzącą w czasie (t) przez powierzchnię (S) ustawioną prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali
- Natężenie dźwięku zależy wprost proporcjonalnie od kwadratu amplitudy fali i kwadratu jej częstotliwości oraz odwrotnie proporcjonalnie od kwadratu odległości od źródła.

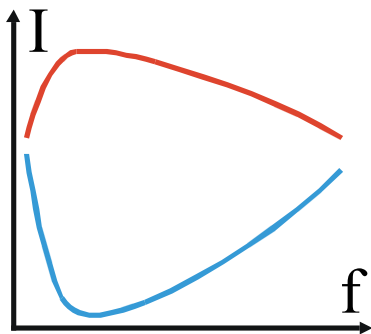
- Poziom natężenia dźwięku (n)  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna mierzona w belach [B] określona jako

$$n = \log_{10} \frac{I}{I_0}, \quad [n] = B$$

- I – natężenie dźwięku

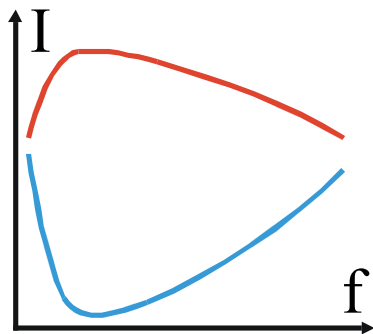
- $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$

- Próg słyszalności (**niebieska linia**)  $\Leftrightarrow$  najmniejsza wartość natężenia (poziomu natężenia) dźwięku o danej częstotliwości rejestrowana przez narząd słuchu człowieka.
- U większości ludzi najniższy próg słyszalności odpowiada częstotliwości 3000 Hz i wynosi około  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> czyli zero beli.
- Najwyższe progi słyszalności odpowiadają krańcowym wartościom częstotliwości słyszalnych.



- Wykres zależności progów słyszalności (niebieska linia) i progów bólu (czerwona linia) od częstotliwości (f) dźwięku

- Próg bólu (**czzerwona linia**)  $\Leftrightarrow$  najmniejsza wartość natężenia (poziomu natężenia) dźwięku o danej częstotliwości wywołująca wrażenie bólu.
- U większości ludzi najwyższy próg bólu odpowiada częstotliwości 3000 Hz i wynosi około  $1 \text{ W/m}^2$  czyli 120 bel.
- Najniższe progi bólu odpowiadają krańcowym wartościom częstotliwości słyszalnych.



- Wykres zależności progów słyszalności (niebieska linia) i progów bólu (czzerwona linia) od częstotliwości ( $f$ ) dźwięku

- Ton harmoniczny 48
- Ton podstawowy 49
- Tony wyższe harmoniczne 50
- Alikwoty 51
- Widmo dźwięku 52
- Kamerton 53

- Ton harmoniczny  $\Leftrightarrow$  prosta akustyczna fala harmoniczna, czyli sinusoidalna fala akustyczna o stałej amplitudzie i częstotliwości. Ton harmoniczny nazywany jest również tonem prostym harmonicznym lub krótko tonem.



- 
- Ton podstawowy  $\Leftrightarrow$  ton harmoniczny o najmniejszej częstotliwości w widmie danego dźwięku okresowego.

- 
- Tony wyższe harmoniczne  $\Leftrightarrow$  składowe tony harmoniczne danego dźwięku okresowego o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami tonu podstawowego.

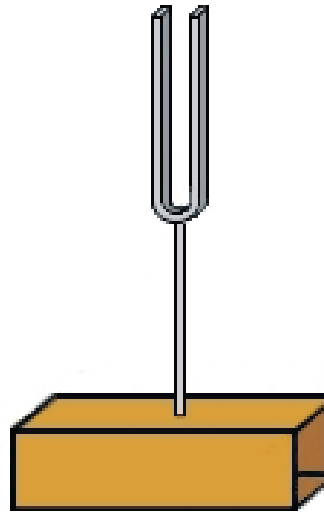
---

- Alikwoty  $\Leftrightarrow$  tony harmoniczne o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości tonu podstawowego.

**C** Alikwoty nazywane są również tonami wyższymi harmonicznymi.

- 
- Widmo dźwięku  $\Leftrightarrow$  zbiór tonów harmoniczných tworzących dany dźwięk.

- Kamerton  $\Leftrightarrow$  przyrząd wydający ton harmoniczny o częstotliwości 440Hz. Kamertony dzielą się na widełkowe i gwizdkowe. Używane są do strojenia instrumentów muzycznych.

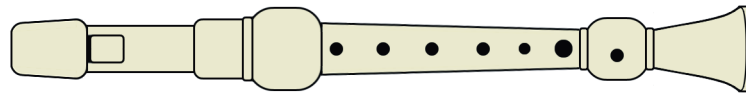


• Kamerton

- Cechy dźwięku 55
- Wysokość dźwięku 56
- Barwa dźwięku 57
- Głośność dźwięku 58
- Prawo Webera-Fechnera 59
- Krzywe izofoniczne 60
- Komora bezdechowa 61

- 
- Cechy dźwięku  $\Leftrightarrow$  subiektywne wrażenia związane z odbiorem danego dźwięku.
  - Są nimi wysokość, barwa oraz głośność.

- Wysokość dźwięku  $\Leftrightarrow$  cecha dźwięku, której miarą jest częstotliwość jego tonu podstawowego.
- Dźwiękom wysokim odpowiadają duże częstotliwości, niskim – małe.



• Flet prosty jest źródłem dźwięków wysokich.

• Tuba jest źródłem dźwięków niskich.

• Ucho ludzkie jest w stanie rozróżnić wysokości dwóch dźwięków, jeżeli stosunek ich częstotliwości wynosi około 1,02.



- Barwa dźwięku  $\Leftrightarrow$  cecha dźwięku nazywana również brzmieniem lub tembrem. Barwa dźwięku zależy od ilości tworzących go tonów wyższych harmonicznym oraz ich natężeń.
- Analiza Fouriera jest analizą dźwięku dokonywaną na bazie twierdzenia Fouriera stanowiącego, że każdy złożony dźwięk okresowy o częstotliwości ( $f$ ) można rozłożyć na tony harmoniczne o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości ( $f$ ).
- W uchu następuje analiza Fouriera złożonych dźwięków, dzięki czemu możemy słyszeć poszczególne dźwięki składowe.

- Głośność dźwięku  $\Leftrightarrow$  subiektywne wrażenie związane z odbiorem dźwięku o danym natężeniu. Głośność dźwięku mierzona jest w fonach.
- Dla danego słuchacza głośność badanego tonu wynosi (n) fonów, jeżeli słyszy on badany ton tak samo głośno jak ton wzorcowy o częstotliwości 1000 Hz i poziomie natężenia wynoszącym (n) decybeli.
- Tylko dla częstotliwości badanego dźwięku równej 1000 Hz skale fonowa i decybelowa są identyczne.
- Ucho ludzkie jest w stanie rozróżnić głośności dwóch dźwięków, jeżeli różnica ich głośności zawarta jest w przybliżeniu w przedziale od połowy fona do jednego fona.

---

- Prawo Webera-Fechnera  $\Leftrightarrow$  prawo głoszące, że głośność danego tonu podstawowego, oceniana subiektywnie przez słuchacza, jest wprost proporcjonalna do poziomemu natężenia tego tonu.

**B** Ernst Heinrich Weber (1795-1878), niemiecki psycholog i fizjolog.

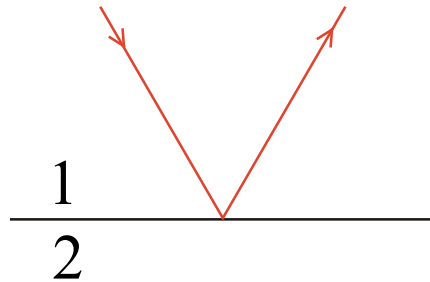
**B** Gustav Theodor Fechner (1801-1887), niemiecki fizyk i psycholog.

- Krzywe izofoniczne  $\Leftrightarrow$  krzywe jednakowej głośności, przedstawiające zależność od częstotliwości poziomów natężeń dźwięków subiektywnie ocenionych przez słuchacza jako jednakowo głośnych.

- 
- Komora bezechowa  $\Leftrightarrow$  pomieszczenie służące do wykonywania pomiarów wielkości akustycznych, niezakłóconych obecnością niepożądanych dźwięków.

- Odbicie fal akustycznych 63
- Załamanie fal akustycznych 65
- Soczewka akustyczna 67
- Kąt graniczny 68
- Całkowite wewnętrzne odbicie fal akustycznych 69
- Falowód akustyczny 70
- Interferencja fal akustycznych 71
- Dudnienia 73
- Dyfrakcja (ugięcie) fal akustycznych 74
- Efekt Dopplera 75
- Częstotliwości drgań własnych 78
- Rezonans 79
- Pudło rezonansowe 80
- Fala uderzeniowa, liczba Macha 81

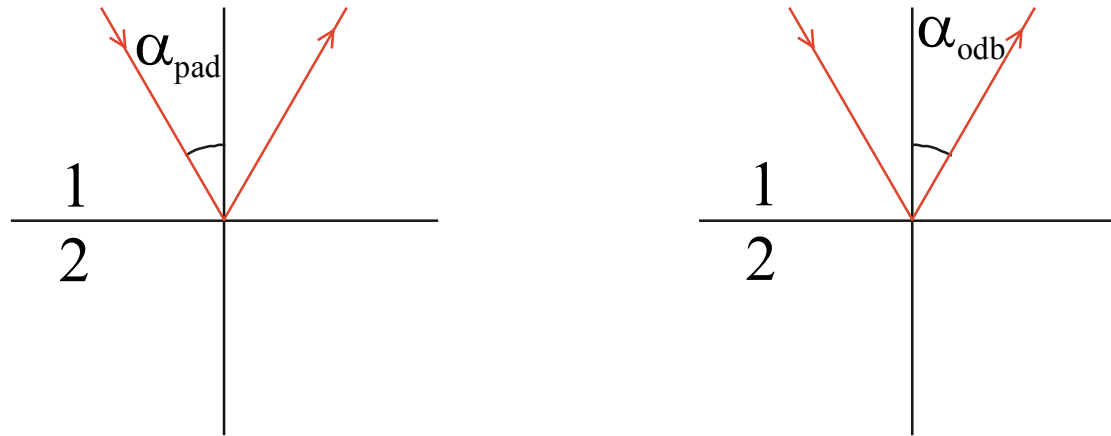
- Odbicie fal akustycznych  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na tym, że na granicy dwóch ośrodków o różnych akustycznych opornościach właściwych fala zmienia kierunek propagacji wskutek odbicia się od powierzchni granicznej.



- Odbicie fal akustycznych

- Akustyczna oporność właściwa jest wielkością skalarną będącą iloczynem gęstości ośrodka i wartości prędkości rozchodzenia się w nim fali akustycznej.

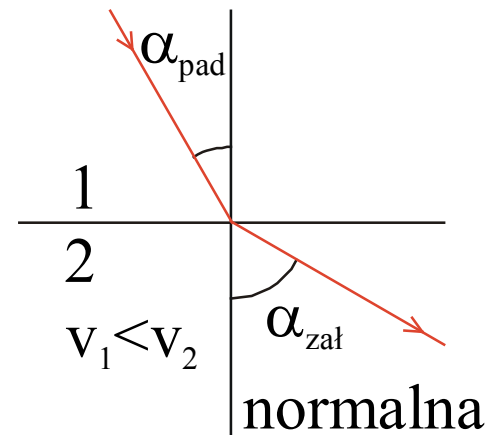
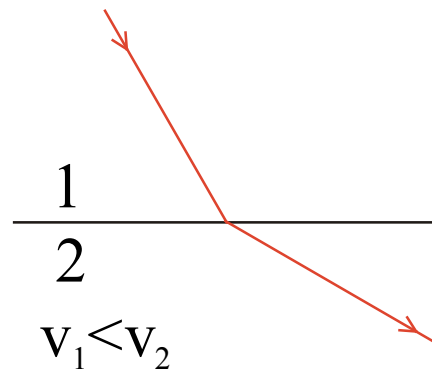
- Prawo odbicia stanowi, że kąt padania ( $\alpha_{\text{pad}}$ ) jest równy kątowi odbicia ( $\alpha_{\text{odb}}$ ).
- Kąty padania i odbicia oraz normalna do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie.



- Fala padająca na granicę dwóch ośrodków o takich samych akustycznych opornościach właściwych nie ulega odbiciu.



- Załamanie fal akustycznych  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na tym, że na granicy dwóch ośrodków o różnych akustycznych opornościach właściwych fala zmienia kierunek propagacji, wchodząc do sąsiedniego ośrodka.



- Fala padająca na granicę dwóch ośrodków o takich samych akustycznych opornościach właściwych nie ulega załamaniu.

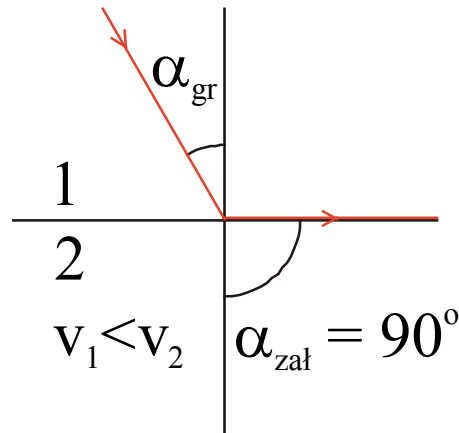
- Prawo załamania stanowi, że kąt padania ( $\alpha_{\text{pad}} \neq 0$ ) oraz kąt załamania ( $\alpha_{\text{zał}} \neq 0$ ) spełniają relację

$$\frac{\sin \alpha_{\text{pad}}}{\sin \alpha_{\text{zał}}} = \frac{v_{\text{pad}}}{v_{\text{zał}}}$$

- $v_{\text{pad}}$  – wartość prędkości fali padającej
- $v_{\text{zał}}$  – wartość prędkości fali załamanej
- Kąty padania i załamania oraz normalna do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie.

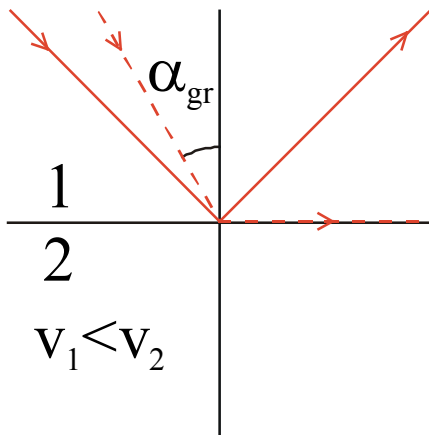
- Soczewka akustyczna  $\Leftrightarrow$  ośrodek gazowy, ciekły lub stały ograniczony dwoma powierzchniami (w tym przynajmniej jedną sferyczną), powodujący skupianie lub rozpraszanie przechodzących przezeń podłużnych fal mechanicznych.

- Kąt graniczny  $\Leftrightarrow$  kąt padania, któremu odpowiada kąt załamania wynoszący  $90^\circ$ .
- Jest to możliwe, gdy fala akustyczna ulega załamaniu do ośrodka, w którym wartość prędkości dźwięku jest większa.



- Kąt graniczny ( $\alpha_{gr}$ )

- Całkowite wewnętrzne odbicie fal akustycznych  $\Leftrightarrow$  zjawisko zachodzące na granicy dwóch ośrodków o różnych akustycznych opornościach właściwych i polegające na tym, że fala akustyczna rozchodząca się w ośrodku ulega jedynie odbiciu od granicy z ośrodkiem, w którym prędkość dźwięku jest większa.
- Przy czym kąt padania musi być większy od kąta granicznego.



- Fala akustyczna padająca na granicę dwóch ośrodków pod kątem większym od kąta granicznego ( $\alpha_{gr}$ ) ulega jedynie odbiciu od tej granicy.

- 
- Falowod akustyczny  $\Leftrightarrow$  pręt wykonany z materiału, w którym wartość prędkości dźwięku jest mniejsza niż w otaczającym go ośrodku.
  - Fala akustyczna zostaje uwięziona wewnątrz falowodu dzięki całkowitym wewnętrznym odbiciom od jego granic.

- 
- Interferencja fal akustycznych  $\Leftrightarrow$  zjawisko nakładania się fal, w wyniku którego powstaje nowa wypadkowa fala.
  - Interferować mogą fale o różnych amplitudach, częstotliwościach, długościach i fazach początkowych, mające w chwili spotkania różne fazy.

- Najprostszy do opisu przypadek zachodzi, gdy interferujące fale mają zgodne kierunki rozchodzenia się, jednakowe amplitudy, częstotliwości, długości oraz fazy początkowe.
- Wypadkowa fala posiada dwukrotnie większą amplitudę, gdy spełniony jest warunek

$$\Delta x = n\lambda$$

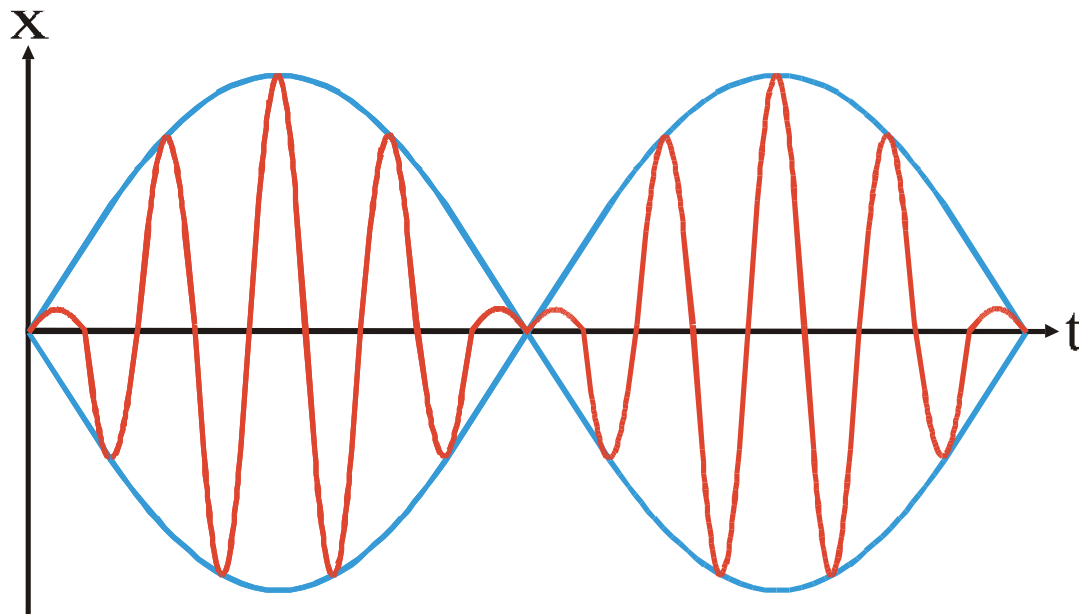
oraz ulega wygaszeniu, gdy

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

- $\Delta x$  – różnica dróg przebytych przez fale
- $n = 0, 1, 2, \dots$

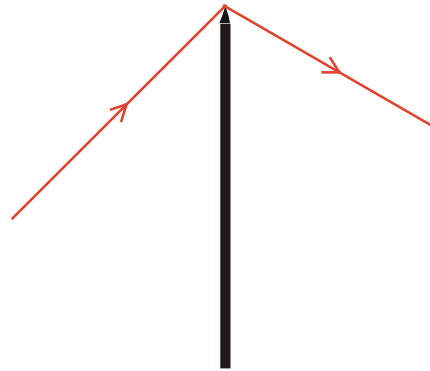


- Dudnienia  $\Leftrightarrow$  podłużne fale mechaniczne o okresowo zmiennej w czasie amplitudzie.
- Dudnienia powstają w wyniku nałożenia się dwóch fal podłużnych o częstotliwościach niewiele różniących się między sobą.



- Wykres zależności współrzędnej wychylenia ( $x$ ) od czasu ( $t$ ) w ustalonym punkcie dudniącej podłużnej fali mechanicznej

- Dyfrakcja (ugięcie) fal akustycznych  $\Leftrightarrow$  zmiana kierunku rozchodzenia się fali akustycznej na krawędziach przeszkody.



- Ugięcie (dyfrakcja) fal akustycznych na krawędzi przeszkody

- 
- Efekt Dopplera  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na pozornej zmianie częstotliwości źródła dźwięku spowodowanej ruchem obserwatora i/lub źródła względem ośrodka.
  - Podczas względnego oddalania się od źródła obserwator słyszy dźwięk niższy, a podczas względnego zbliżania się do źródła – wyższy w stosunku do wysokości dźwięku odbieranego podczas spoczynku względem źródła.

- Obserwator zbliżający się do nieruchomego źródła z prędkością o wartości ( $v_o$ ) względem ośrodka słyszy dźwięk o częstotliwości ( $f_{zbl}$ )

$$f_{zbl} = f \left( 1 + \frac{v_o}{v} \right)$$

- Obserwator oddalający się od nieruchomego źródła z prędkością o wartości ( $v_o$ ) względem ośrodka słyszy dźwięk o częstotliwości ( $f_{odd}$ )

$$f_{odd} = f \left( 1 - \frac{v_o}{v} \right)$$

- $f$  – częstotliwość dźwięku wysyłanego przez źródło
- $v$  – wartość prędkości dźwięku w ośrodku

**H** Wpływ ruchu źródła i obserwatora na częstotliwość fal akustycznych został teoretycznie uzasadniony przez Dopplera w 1842.

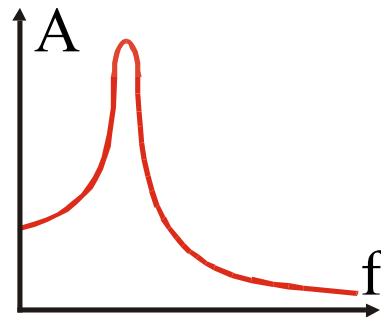
**C** Akustyczny efekt Dopplera został potwierdzony doświadczalnie po raz pierwszy w 1845 w Utrechcie przez Buysa-Ballota. Źródłem dźwięku był poruszający się pociąg z trębaczami.

**B** Christian Johann Doppler (1803-1853), austriacki fizyk, matematyk i astronom.

**B** Christophorus Henricus Diedericus Buys-Ballot (1817-1890), holenderski chemik i meteorolog.

- Częstotliwości drgań własnych  $\Leftrightarrow$  zbiór częstotliwości swobodnych drgań, jakie może wykonywać układ drgający.

- Rezonans  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na gwałtownym wzroście amplitudy drgań wymuszonych przy zbliżaniu się częstotliwości siły wymuszającej do wartości tak zwanej częstotliwości rezonansowej.
- W przypadku swobodnego układu drgającego częstotliwości rezonansowe są równe częstotliwościom drgań własnych tego układu.



• Wykres zależności amplitudy drgań wymuszonych (A) od częstotliwości siły wymuszającej (f)

- Rezonans akustyczny jest rezonansem wywołanym przez falę akustyczną.

- Pudło rezonansowe  $\Leftrightarrow$  pudło, które wskutek rezonansu akustycznego zwiększa amplitudy tonów harmoniczných o częstotliwościach odpowiadających częstotliwościom drgań własnych tego pudła.

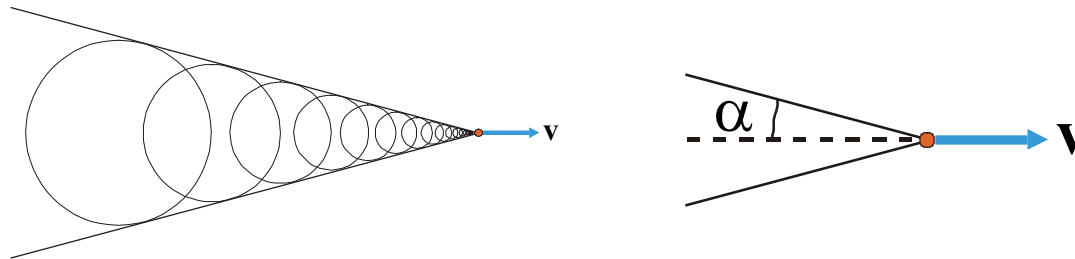


- Pudło rezonansowe gitary



- Fala uderzeniowa  $\Leftrightarrow$  fala wywołana przez ciało poruszające się w powietrzu (lub innym ośrodku) z prędkością o wartości ( $v$ ) większej od wartości prędkości dźwięku ( $v_d$ ).
- Czoło fali uderzeniowej ma kształt powierzchni stożka, w którego wierzchołku znajduje się źródło. Powierzchnia tego stożka tworzy z kierunkiem ruchu ciała kąt ( $\alpha$ ) spełniający zależność

$$\sin \alpha = \frac{v_d}{v}$$

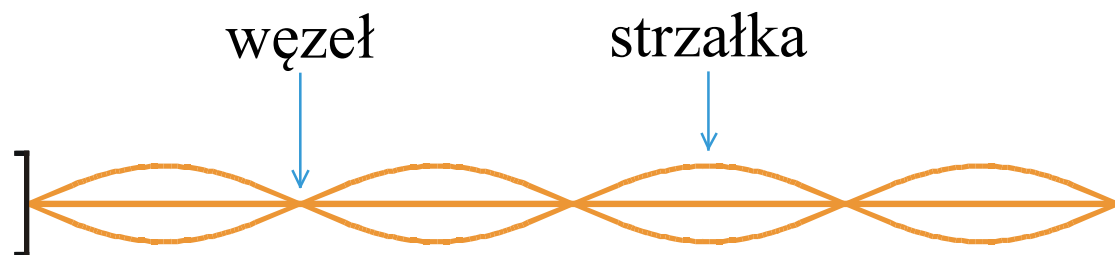


- Czoło fali uderzeniowej w kolejnych chwilach czasu

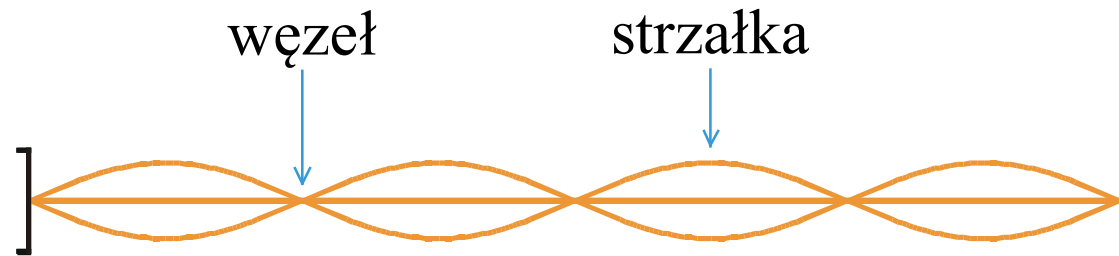
- Stosunek  $\frac{v}{v_d}$  nazywany jest liczbą Macha.

- Fala stojąca 83
- Figury Chladniego 85
- Rura Kundta 86

- Fala stojąca  $\Leftrightarrow$  fala powstała w wyniku interferencji dwóch fal biegnących w przeciwnych kierunkach, o takich samych amplitudach, częstotliwościach, długościach i prędkościach.
- Punkty, w których amplituda fali stojącej jest równa zero, nazywane są węzłami, a punkty, w których jest maksymalna – strzałkami.



- Trzy charakterystyczne położenia drgającej struny, której końce zostały unieruchomione.



- Odległości między dwoma węzłami ( $x_{WW}$ ), dwoma strzałkami ( $x_{SS}$ ) oraz węzłem i strzałką ( $x_{WS}$ ) wynoszą

$$x_{WW} = x_{SS} = n \frac{\lambda}{2}$$

$$x_{WS} = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$$

- $\lambda$  – długość fali stojącej
- $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

- 
- Figury Chladniego  $\Leftrightarrow$  figury utworzone przez ziarenka piasku, którym posypana jest drgająca pozioma płyta metalowa lub szklana.
  - Figury te powstają w wyniku zbierania się ziarenek piasku w węzłach poprzecznej fali stojącej, wywołanej przez pocieranie krawędzi płyty smyczkiem.

- Rura Kundta  $\Leftrightarrow$  szklana rura ustawiona poziomo, wewnątrz na jej spodzie rozmieszczony jest równomiernie proszek korkowy. Z jednej strony rury znajduje się ruchomy tłok, z drugiej strony do jej wnętrza włożony jest pręt o długości ( $L$ ), podparty w środku i pocierany tak, aby mogła powstać w nim podłużna fala stojąca o długości ( $2L$ ). Na końcu pręta, znajdującym się w rurze, przymocowany jest korkowy (lekki) krążek przylegający ściśle do jej ściany. W węzłach fali stojącej, powstałej w gazie wypełniającym rurę, pojawiają się zagęszczenia pyłu korkowego. Odległość między dwoma sąsiednimi węzłami jest równa połowie długości tej fali. Położenie tłoka należy dobrać tak, aby wystąpił rezonans między drganiami pręta i gazu w rurze. Wtedy częstotliwości ( $f$ ) obu drgań będą identyczne.

- Rura Kundta służy między innymi do pomiarów wartości prędkości dźwięku w gazach ( $v_g$ ) i ciałach stałych ( $v_s$ ) w oparciu o równania:

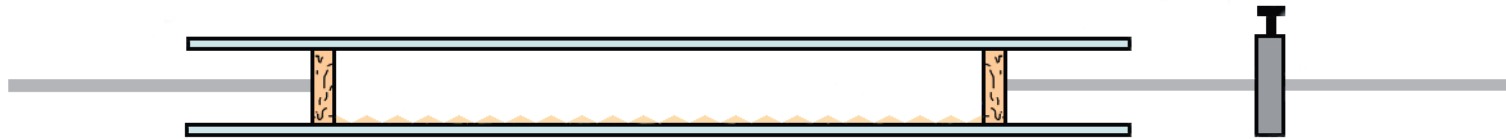
$$v_s = f \lambda_s$$

- $\lambda_s$  – długość fali stojącej w ciele stałym, z którego wykonany jest pręt

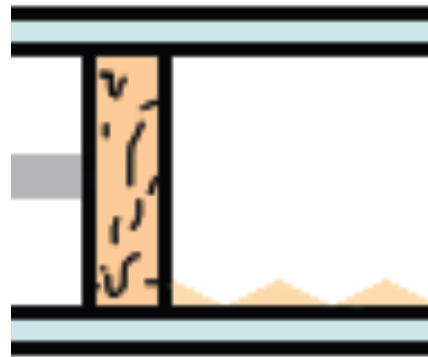
$$v_g = f \lambda_g$$

- $\lambda_g$  – długość fali stojącej w gazie wypełniającym rurę

**B** August Adolph Eduard Eberhard Kundt (1839-1894), niemiecki fizyk.



• Rura Kundta



• Fragment rury Kundta w powiększeniu





# Wykłady z Fizyki 02



Zbigniew Osiak

**Akustyka**