

Fizyka 1B

Wykład 13

dr Piotr Sitarek, prof. uczelni

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej

Dźwięk

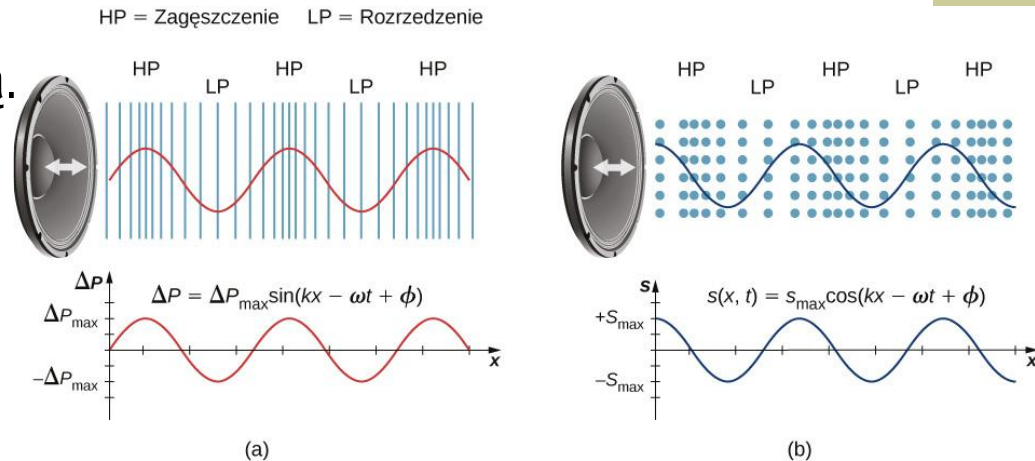
- Fale dźwiękowe
- Prędkość dźwięku
- Natężenie dźwięku
- Tryby drgań fali stojącej
- Źródła dźwięków muzycznych
- Dudnienia
- Efekt Dopplera
- Fale uderzeniowe

Dźwięk

- **Dźwięk** słyszalny przez człowieka jest rozchodzącym się zaburzeniem ośrodka sprężystego, czyli falą mechaniczną o częstotliwości z zakresu ok. 20 Hz – 20 kHz.
- Słuch jest percepcją dźwięku, podobnie jak wzrok jest percepcją światła widzialnego.
- W skali atomowej (mikroskopowej) dźwięk jest zaburzeniem atomów, który jest znacznie bardziej uporządkowany niż ich ruchy termiczne.
- W wielu przypadkach dźwięk jest falą okresową, a cząstki wykonują prosty ruch harmoniczny. W ten sposób fale dźwiękowe mogą powodować drgania i efekty rezonansowe.

Dźwięk

- Głośnik wytwarza falę dźwiękową poprzez drgania membrany, powodując drgania cząsteczek powietrza.
- Głośnik drga ze stałą częstotliwością i stałą amplitudą, pobudzając do drgań cząsteczki powietrza znajdujące się w pobliżu.
- Membrana głośnika, drgając, przekazuje energię do powietrza, głównie w postaci energii cieplnej. Niewielka część energii głośnika powoduje sprężenia i rozrzedzenia otaczającego powietrza, prowadząc do lokalnych zmian ciśnienia powietrza.
- Zagęszczenia, czyli obszary wysokiego ciśnienia, i rozrzedzenia, czyli obszary niskiego ciśnienia, rozprzestrzeniają się jako podłużne fale ciśnienia mające taką samą częstotliwość jak membrana.
- Zmiany te są falą dźwiękową.



Dźwięk

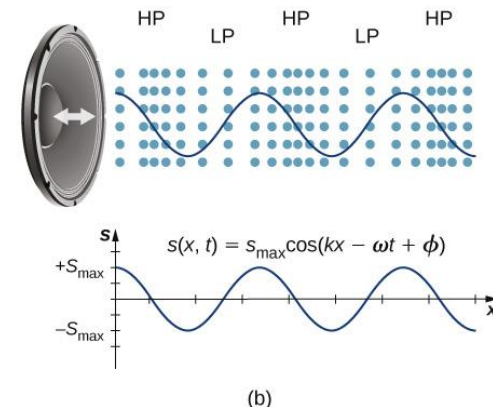
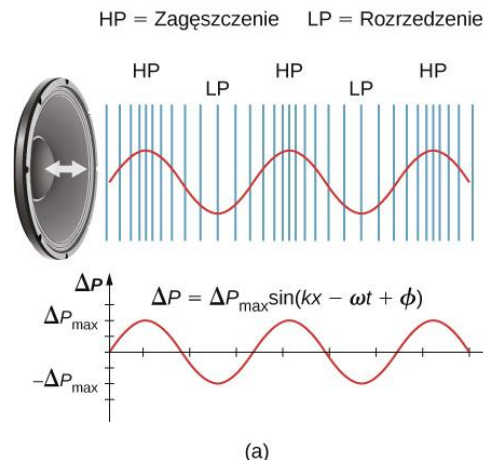
- Dźwięk może być modelowany jako zmiany ciśnienia powietrza wokół wartości średniej:

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_{\max} \sin(kx \mp \omega t + \phi)$$

lub

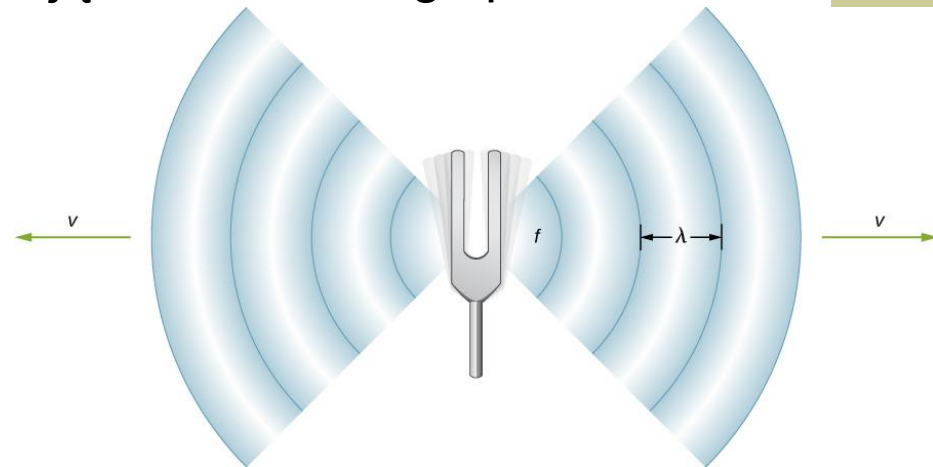
- jako wychylenie cząsteczek powietrza:

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



Prędkość dźwięku

- Dźwięk jak wszystkie fale propaguje się z określoną prędkością oraz posiada określoną częstotliwość i długość.
- Różnica między prędkością dźwięku a prędkością światła można zaobserwować np. podczas wyładowań atmosferycznych.
- Licząc sekundy między zaobserwowanym błyskiem a usłyszonym grzmotem, można oszacować jak daleko uderzył piorun.
- Światło dociera do oka niemal błyskawicznie, a dźwięk na pokonanie kilometra potrzebuje niecałych trzech sekund.
- Częstotliwość fali dźwiękowej jest taka sama jak częstotliwość źródła i jest liczbą fal, które docierają do określonego punktu ośrodka w jednostce czasu.



Prędkość dźwięku

- Prędkość dźwięku zależy od tego jak szybko energia akustyczna może być przenoszona przez ośrodek.
- Stąd prędkość dźwięku w danym ośrodku zależy od rodzaju i stanu ośrodka.
- Ogólnie, prędkość dźwięku dla fali mechanicznej w ośrodku zależy od pierwiastka kwadratowego ilorazu sprężystości i bezwładności:

$$v = \sqrt{\frac{\text{sprężystość}}{\text{bezwładność}}}$$

- Fale dźwiękowe spełniają równanie falowe:

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

Prędkość dźwięku

- W płynach prędkość dźwięku zależy od modułu sprężystości objętościowej i gęstości:

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

- Prędkość dźwięku w ciele stałym zależy od modułu Younga i gęstości ośrodka:

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

- W gazie doskonałym wzór na prędkość dźwięku jest następujący:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa R T_K}{M}}$$

gdzie κ jest wykładnikiem adiabaty, $R = 8,31 \text{ J/(mol K)}$ jest stałą gazową, T_K temperaturą bezwzględną w Kelwinach, natomiast M jest masą cząsteczkową.

- W ogólnym przypadku im bardziej sztywny (mniej ściśliwy) ośrodek, tym wyższa prędkość dźwięku.

Prędkość dźwięku

Ośrodek	v (m/s)
<i>Gazy w temperaturze 0 °C</i>	
Powietrze	331
Dwutlenek węgla	259
Tlen	316
Hel	965
Wodór	1290

<i>Ciecze w temperaturze 20 °C</i>	
Etanol	1160
Rtęć	1450
Woda	1480
Woda morska	1540
Ludzka tkanka	1540

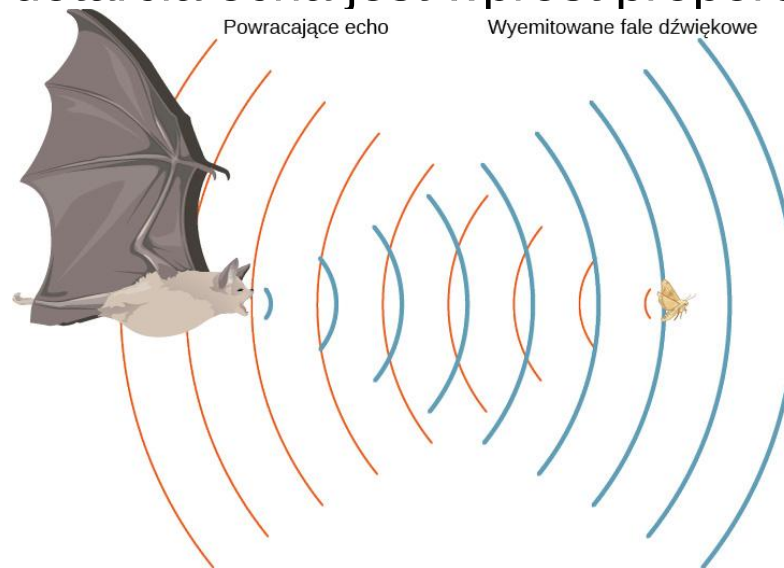
<i>Ciała stałe (fale podłużne lub objętościowe)</i>	
Guma wulkanizowana	54
Polietylen	920
Marmur	3810
Szkło	5640
Ołów	1960
Aluminium	5120
Stal	5960

Prędkość dźwięku

- Ponieważ prędkość dźwięku zależy od gęstości materiału, a gęstość zależy od temperatury, istnieje zależność pomiędzy temperaturą ośrodka i prędkością rozchodzącego się w nim dźwięku.
- Prędkość dźwięku w powietrzu dana jest wzorem:

$$v = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{1 + \frac{T_C}{273^\circ\text{C}}} = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} \sqrt{\frac{T_K}{273 \text{ K}}}$$

- Nietoperz wykorzystuje zjawisko echa do określenia odległości od zdobyczy. Czas dotarcia echa jest wprost proporcjonalny do odległości.



Prędkość dźwięku

- W danym ośrodku fale propagują się z taką samą prędkością.
- Jednak prędkość dźwięku jest prawie niezależna od częstotliwości (w przestrzeni otwartej) – co można zaobserwować np. w czasie koncertu.

$$v = f\lambda$$

- Z tego powodu dźwięki o niskich częstotliwościach muszą mieć większe długości fal od dźwięków o wysokich częstotliwościach.
- Np. dźwięki o niskich częstotliwościach są generowane przez membranę o większej średnicy (głośnik niskotonowy), natomiast dźwięki o wyższych częstotliwościach – przez membranę o mniejszej średnicy (głośnik wysokotonowy).

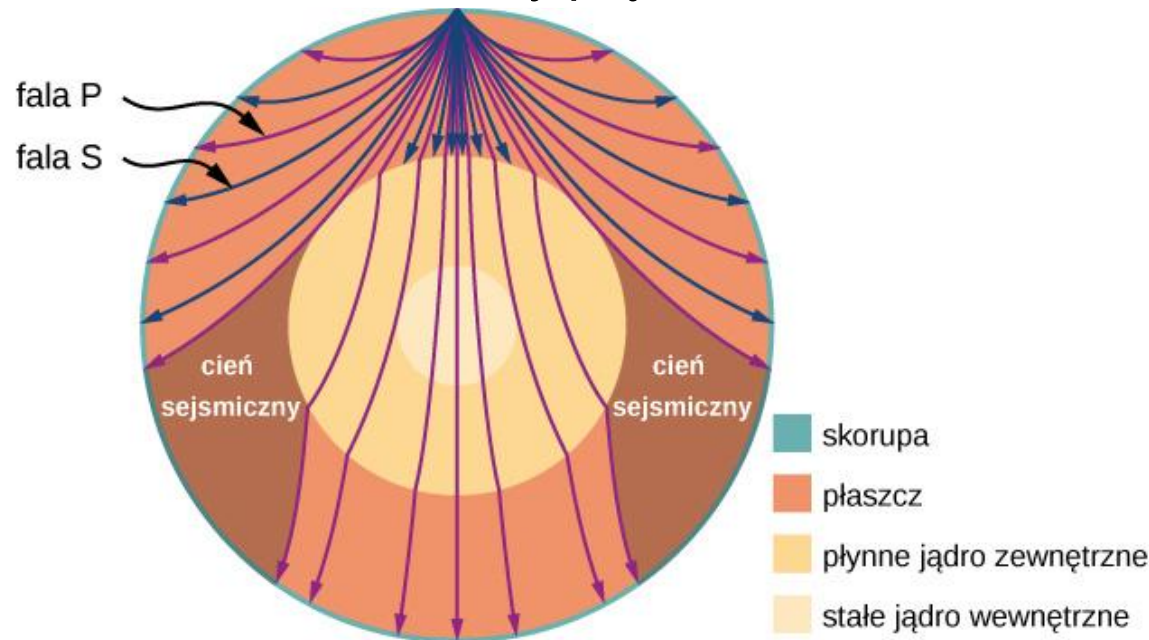


Prędkość dźwięku

- Prędkość dźwięku może się zmieniać, gdy dźwięk przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, ale zwykle częstotliwość pozostaje taka sama.
- Jeśli v się zmienia i f pozostaje taka sama, wówczas długość fali musi się zmieniać: $v = f \lambda$ - wyższa prędkość dźwięku to większa długość fali dla danej częstotliwości.

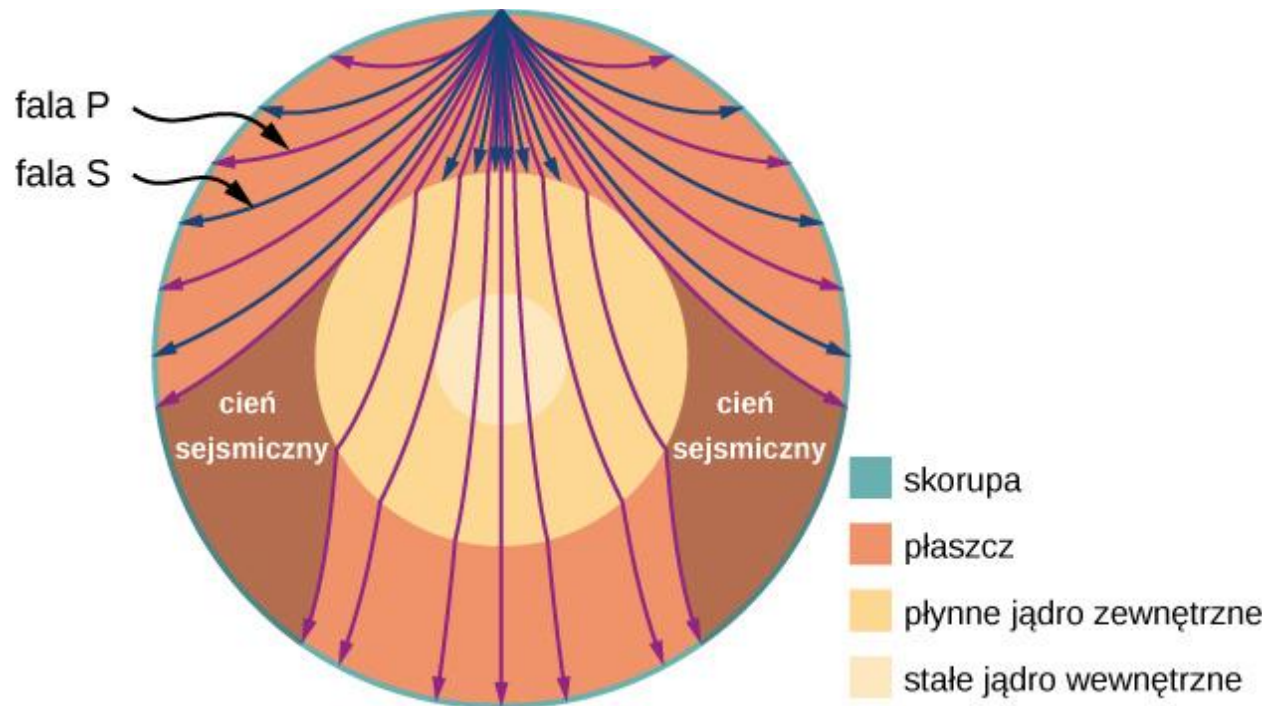
Prędkość dźwięku

- Choć fale dźwiękowe w powietrzu są falami podłużnymi, w ciele stałym poruszają się w postaci fal podłużnych i poprzecznych.
- Trzęsienia ziemi wytwarzają zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne, które poruszają się z różnymi prędkościami - prędkość fal podłużnych (P) w granicie podczas trzęsień ziemi jest znacznie większa niż prędkość fal poprzecznych (S).
- Oba rodzaje fal trzęsień ziemi przemieszczają się wolniej w mniej sztywnych materiałach, takich jak osady.
- Fale P mają prędkości od 4 do 7 km/s, a zakresy prędkości fal S wynoszą od 2 do 5 km/s.



Prędkość dźwięku

- Fale P propagują się dalej niż fale S podczas przechodzenia przez skorupę ziemską.
- Czas pomiędzy falami P i S jest powszechnie używany do określenia odległości od epicentrum trzęsienia ziemi.
- Ponieważ fale S nie przechodzą przez ciekły rdzeń (brak modułu sztywności), a fale P załamują się na granicy płaszcz-jądro, tworzą się dwa obszary cienia.



Natężenie dźwięku

- W cichym lesie możesz czasami usłyszeć pojedynczy spadający na ziemię liść.
- Kiedy głośno gra muzyk, nie słysząc nawet tego, co mówi osoba siedząca obok.
- Duży poziom hałasu jest niebezpieczny dla narządu słuchu.
- Wielkością fizyczną, która opisuje fale dźwiękowe, niezależnie od tego, czy są one z zakresu słyszalnego czy nie, jest natężenie dźwięku.

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

- Moc P określa, jak szybko energia jest przenoszona przez falę, A oznacza powierzchnię, przez którą przepływa moc.

Natężenie dźwięku

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

- Jeśli założymy, że fala dźwiękowa jest kulista oraz że nie ma żadnych strat związanych z procesami termicznymi, wówczas rozchodząca się fala ma coraz większą powierzchnię i z tego powodu spada jej natężenie.
- Powierzchnia sfery wynosi $A = 4\pi r^2$.
- Jeśli fala rozchodzi się od r_1 do r_2 wówczas energia również przechodzi przez większą powierzchnię:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \\ I_1 4\pi r_1^2 &= I_2 4\pi r_2^2 \end{aligned}$$

$$I_2 = I_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$$

- Mówiąc o natężeniu fali dźwiękowej, rozważamy uśrednioną w czasie moc podzieloną przez powierzchnię:

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

Natężenie dźwięku

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

- Można pokazać, że natężenie fali jest proporcjonalne do zmian kwadratu ciśnienia i odwrotnie proporcjonalne do gęstości oraz prędkości:

$$I = \frac{(\Delta p_{\max})^2}{2\rho v}$$

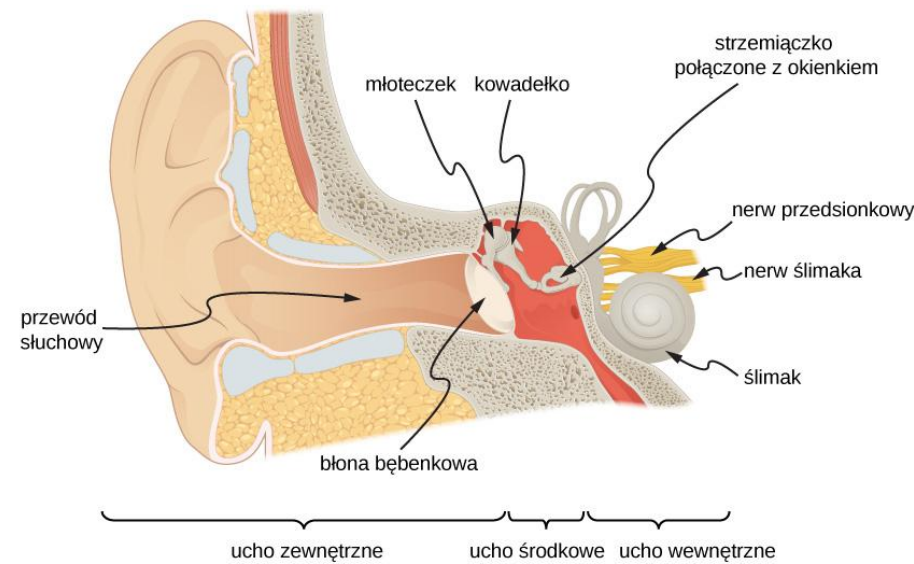
- w powyższym wzorze $\Delta p_{\max}$ oznacza zmianę ciśnienia lub amplitudę ciśnienia w paskalach (Pa), ρ jest gęstością ośrodka w którym propaguje się fala dźwiękowa, natomiast v jest prędkością dźwięku w ośrodku.

Natężenie dźwięku

- Słyszenie oznacza percepcję dźwięku.
- Fala dźwiękowa, która dociera do naszego ucha, jest falą zmian ciśnienia powietrza.
- Ucho jest przetwornikiem, który zamienia falę dźwiękową na szereg impulsów elektrycznych, w sposób bardziej skomplikowany niż w przypadku mikrofonu.
- Ucho zewnętrzne przenosi dźwięk do błony bębenkowej. Dla częstotliwości 2 kHz – 5 kHz (w zakresie dźwięków ludzkiej mowy) w zewnętrznym przewodzie słuchowym następuje rezonacja słupa powietrza. Dzięki temu ucho człowieka jest wyjątkowo dobrze dostosowane do odbierania

ludzkiej mowy.

Ucho środkowe zamienia dźwięk na drgania mechaniczne, a następnie dostarcza te drgania do ślimaka.



Natężenie dźwięku

- Zakres natężeń, które ucho ludzkie może odbierać, zależy od częstotliwości dźwięku, ale w ogólnym przypadku zakres ten jest bardzo szeroki.
- Progowa wartość natężenia, które może być słyszalne, wynosi $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.
- Ból odczuwalny jest dla natężenia $I_{\text{ból}} = 1 \text{ W/m}^2$.
- Ponieważ jednak ucho ludzkie rejestruje natężenie logarytmiczne, wygodniej jest stosować skalę Bela.
- Poziom natężenia dźwięku β , mierzony w decybelach definiuje się jako:

$$\beta = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

- gdzie I_0 jest progową wartością natężenia (dla normalnie słyszącej osoby), odpowiadającą natężeniu dźwięku o częstotliwości 1000 Hz.

Natężenie dźwięku

- Powierzchnia błony bębenkowej wynosi ok. 1 cm^2 , co oznacza, że dla progu słyszenia pada na nią dźwięk o mocy 10^{-16} W .
- Odpowiada to zmianom ciśnienia mniejszym niż 10^{-9} atm .

Poziom natężenia dźwięku β (dB)	Natężenie I (W/m^2)	Przykład/efekt
0	$1 \cdot 10^{-12}$	Próg słyszenia dla częstotliwości 1000 Hz
10	$1 \cdot 10^{-11}$	Szelest liści
60	$1 \cdot 10^{-6}$	Normalna rozmowa
70	$1 \cdot 10^{-5}$	Hałaśliwe biuro, duże natężenie ruchu samochodowego
80	$1 \cdot 10^{-4}$	Głośnie radio, klasa szkolna
90	$1 \cdot 10^{-3}$	Wewnątrz samochodu ciężarowego, uszkodzenia słuchu powodowane długą ekspozycją na hałas ¹
100	$1 \cdot 10^{-2}$	Głośny zakład przemysłowy, syrena w odległości 30 m, uszkodzenia słuchu powodowane 8-godzinną ekspozycją na hałas
110	$1 \cdot 10^{-1}$	Uszkodzenia słuchu powodowane 30-minutową ekspozycją na hałas
120	1	Głośny koncert rockowy, młot pneumatyczny w odległości 2 m, próg bólu
140	$1 \cdot 10^2$	Samolot odrzutowy w odległości 30 m, silny ból, utrata słuchu
160	$1 \cdot 10^4$	Zniszczenie błony bębenkowej

Słyszenie i wysokość dźwięku

- Ucho ludzkie potrafi dostarczyć nam szereg informacji – takich jak wysokość, głośność i kierunek rozchodzenia się dźwięku.
- Percepcja częstotliwości to rejestrowanie **wysokości dźwięku**.
- Zwykle ludzie mają doskonałą względną zdolność oceny wysokości dźwięku i potrafią rozróżnić dwa dźwięki o odmiennych częstotliwościach różniących się od siebie o ok. 0,3%. Na przykład dźwięki o częstotliwościach 500 i 501,5 Hz.
- Percepcja natężenia oznacza rejestrowanie dźwięków o różnej **głośności**.
- Można już usłyszeć różnicę ok. 1 dB.
- Głośność nie jest związana wyłącznie z natężeniem. Na percepcję głośności ma wpływ częstotliwość dźwięku.
- Dźwięki o wysokich i niskich częstotliwościach wydają się mniej głośne, ponieważ ucho ludzkie jest mniej na nie wrażliwe.
- Każdy instrument wytwarza charakterystyczny zbiór częstotliwości i natężeń.
- Kombinację częstotliwości oraz natężeń nazywamy zwykle **barwą dźwięku**. Barwa dźwięku jest wynikiem wielu odbić, rezonansów i superpozycji fal w instrumencie.

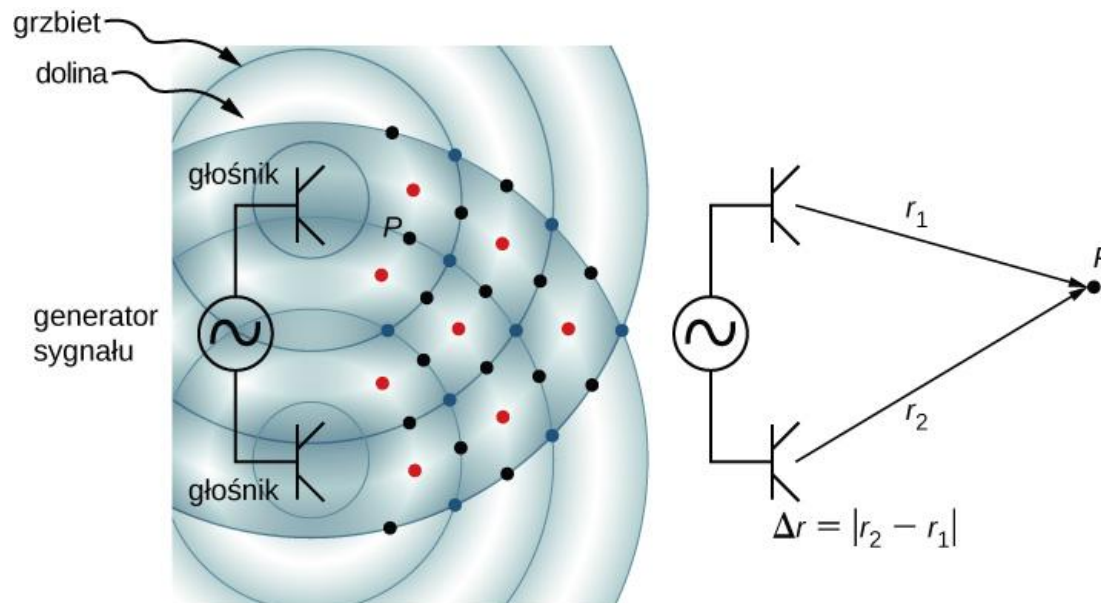
Drgania fali stojącej

Interferencja fal dźwiękowych

- Jeśli fale, które początkowo mają takie same fazy przebędą różne odległości, ich fazy zaczną się różnić.
- Funkcja opisująca falę wypadkową, która jest superpozycją fal różniących się o ϕ

$$y(x, t) = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

- Gdy fale opuszczają głośnik, propagują się jako fale sferyczne.

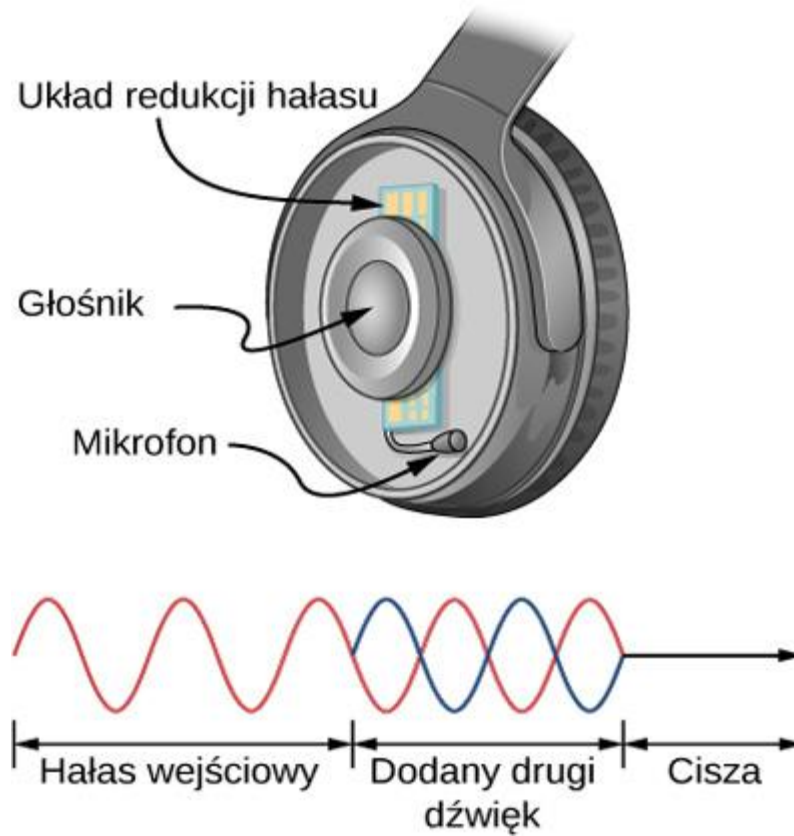


- Interferencja konstruktywna – dwa grzbiety
- Interferencja konstruktywna – dwie doliny
- Interferencja destruktywna – jeden grzbiet i jedna dolina

Drgania fali stojącej

Redukcja hałasu dzięki interferencji

- Słuchawki zaprojektowane w celu redukcji hałasu z wykorzystaniem destruktywnej interferencji, tzn. działające poprzez dodanie sygnału odwróconego w fazie w stosunku do sygnału oryginalnego.



Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze jednostronnie zamkniętej

- Fale stojące są wynikiem sumowania dwóch fal poruszających się w przeciwnych kierunkach.
- Gdy te dwie fale interferują, wówczas powstaje fala stojąca:

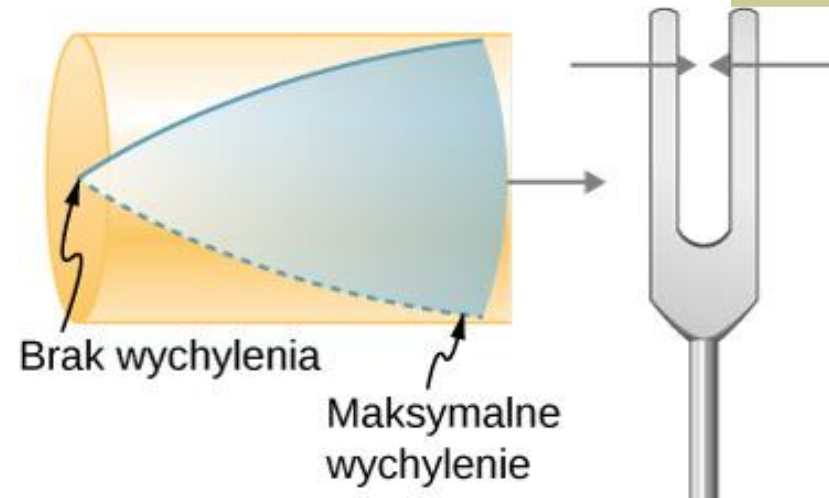
$$y_R(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$$

- Węzły definiujemy jako punkty, w których struna się nie porusza.
- Przyjęcie symetrycznych warunków brzegowych powoduje, że niektóre częstotliwości rezonują, powodując powstanie fal stojących, podczas gdy inne interferują destruktywnie.

Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze jednostronnie zamkniętej

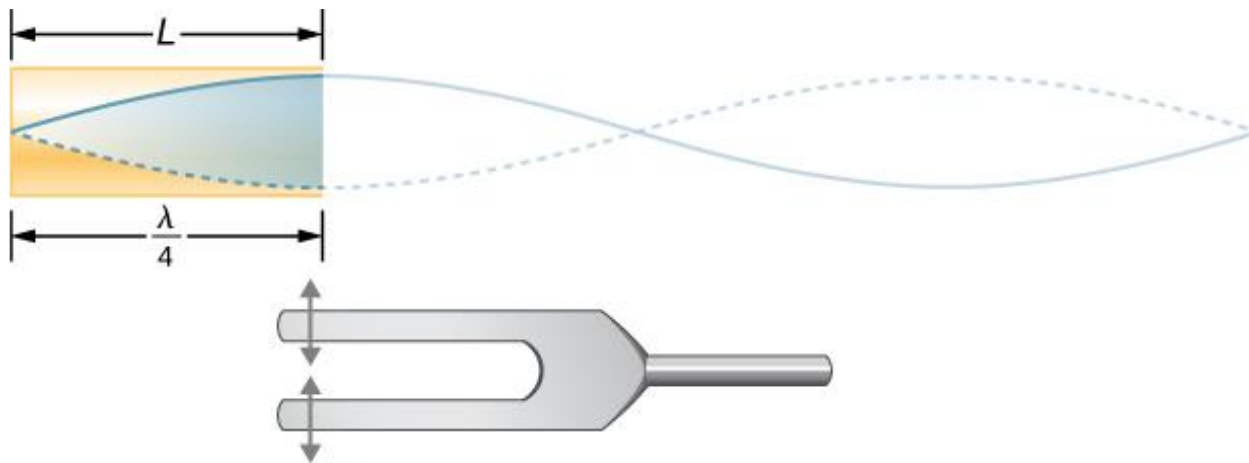
- Weźmy rurę z jednej strony zamkniętą, a z drugiej otwartą.
- Jeśli trzymamy kamerton w pobliżu otwartej strony rury, dźwięk propaguje się wewnątrz rury i odbija się od jej końca.
- Odbity dźwięk posiada taką samą częstotliwość i długość fali jak dźwięk oryginalny, przy czym porusza się w przeciwnym kierunku.
- Na końcu rury cząsteczki powietrza mają bardzo mało miejsca, aby wykonywać drgania, co skutkuje powstaniem węzła.
- Na końcu otwartej części rury cząsteczki powietrza mają dużą swobodę, by wykonywać drgania, i dla odpowiednich częstotliwości tworzy się wówczas strzałka.



Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze jednostronnie zamkniętej

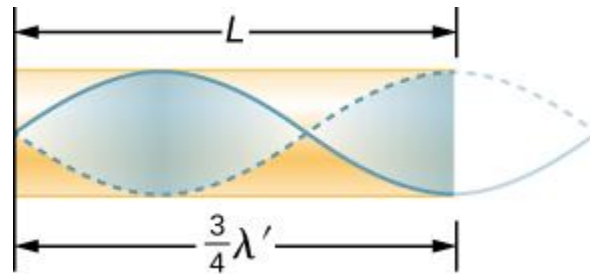
- Jeśli kamerton ma odpowiednią częstotliwość, słup powietrza w rurze rezonuje bardzo mocno, ale dla większości częstotliwości rezonuje bardzo słabo.
- Oznacza to, że słup powietrza w rurze ma swoją częstotliwość własną.
- Odległość pomiędzy węzłem i strzałką wynosi jedną czwartą długości fali.



Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze jednostronnie zamkniętej

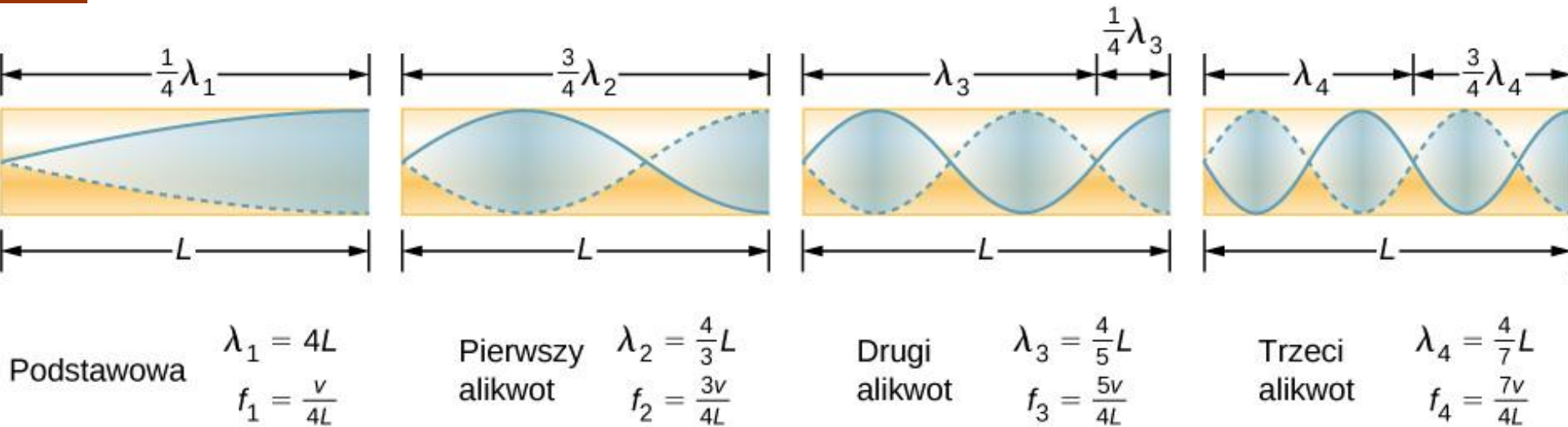
- W rurze mogą rezonować także inne fale o krótszej długości:



- Najniższa częstotliwość, dla której występuje rezonans, nazywa się częstotliwością podstawową, natomiast wszystkie wyższe częstotliwości rezonansowe nazywane są alikwotami (ang. *overtones*).
- Wszystkie częstotliwości rezonansowe są wielokrotnością częstotliwości podstawowej i są wspólnie nazywane harmonicznymi (ang. *harmonics*).
- Częstotliwość podstawowa jest pierwszą harmoniczną, pierwszy alikwot jest drugą harmoniczną, itd..

Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze jednostronnie zamkniętej



- W rurze jednostronnie zamkniętej rezonans występuje dla następującej długości fal:

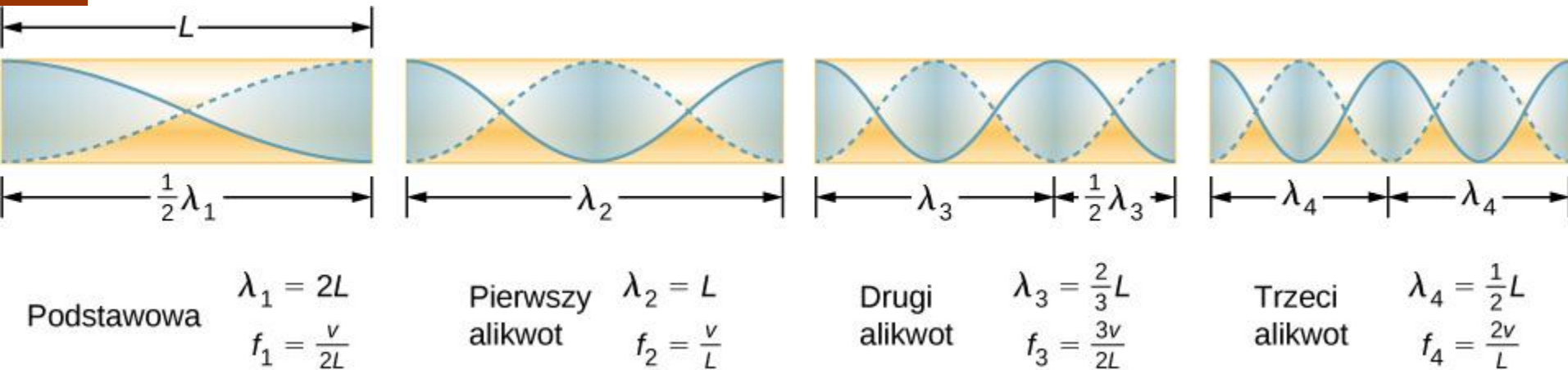
$$\lambda_n = \frac{4}{n}L, \quad \text{gdzie } n = 1, 3, 5, \dots$$

- Częstotliwości rezonansowe w rurze jednostronnie otwartej występują dla:

$$f_n = n \frac{v}{4L}, \quad \text{dla } n = 1, 3, 5, \dots$$

Drgania fali stojącej

Rezonans w rurze obustronnie otwartej



- W rurze obustronnie otwartej rezonans występuje dla następujących długości fal:

$$\lambda_n = \frac{2}{n}L, \quad \text{dla } n = 1, 2, 3, \dots$$

- Częstotliwości rezonansowe w rurze obustronnie otwartej:

$$f_n = n \frac{v}{2L}, \quad \text{dla } n = 1, 2, 3, \dots$$

Źródła dźwięków muzycznych

- Niektóre instrumenty muzyczne – instrumenty dęte drewniane, miedźne, organy piskawkowe – można modelować jako rury z symetrycznymi warunkami brzegowymi obustronnie otwartymi lub zamkniętymi.
- Inne instrumenty mogą być modelowane jako rury z niesymetrycznymi warunkami brzegowymi, z jednej strony otwarte, a z drugiej zamknięte.
- Organy piskawkowe składają się z różnych piskawek (rur) o określonych długościach, w celu wytworzenia różnych częstotliwości. Fale są wynikiem sprężania powietrza, które może się następnie rozprężyć w rurach.
- Muzycy grający na instrumentach takich jak flet czy obój zmieniają długość rury poprzez otwieranie i zamykanie otworów palcami.
- Na puzonie długość rury można zmieniać za pomocą rury przesuwnej.
- Trąbki posiadają określoną długość i mogą generować dźwięki o określonych częstotliwościach.

Źródła dźwięków muzycznych

- Jeśli nawet częstotliwość podstawowa jest taka sama, to alikwoty i ich kombinacje są różne.
- To sprawia, że różne instrumenty muzyczne (jak również ludzkie głosy) posiadają cechy charakterystyczne, niezależnie od tego, czy dźwięki wywołują słupy powietrza, struny, komory dźwiękowe czy bębny.
- W rzeczywistości np. nasza mowa jest wyznaczana przez kształt wnęki utworzonej przez gardło i usta w celu otrzymania odpowiedniej częstotliwości podstawowej i alikwotów.
- Jeśli mamy dwie rury z taką samą częstotliwością podstawową, ale jedna z nich jest jednostronnie zamknięta, a druga obustronnie otwarta, ich dźwięki brzmią inaczej, ponieważ mają różne alikwoty.
- Na przykład środkowe C grane na rurze otwartej brzmiałyby głośniej, ponieważ ma parzyste i nieparzyste wielokrotności częstotliwości podstawowej.
- Zamknięta rura ma tylko nieparzyste wielokrotności.

Źródła dźwięków muzycznych

Rezonans

- Instrumenty dęte wykorzystują rezonans słupa powietrza do wzmocnienia tonów generowanych np. przez usta.
- Skrzypce i gitara mają pudła rezonansowe, ale o różnych kształtach, co sprawia, że mają różną strukturę alikwotów.
- Wibrująca struna generuje dźwięk, który rezonuje w pudle rezonansowym, wzmacniając w ten sposób dźwięk i tworząc efekty, które nadają instrumentowi charakterystyczną barwę.
- Im bardziej skomplikowany jest kształt pudła rezonansowego, tym większa jest jego zdolność do rezonowania w szerokim zakresie częstotliwości.

Dudnienia

- Jeśli dwa dźwięki różnią się częstotliwością, fala wypadkowa może być zapisana jako:

$$y_1 = A \cos(k_1 x - 2\pi f_1 t) \quad \text{oraz} \quad y_2 = A \cos(k_2 x - 2\pi f_2 t)$$

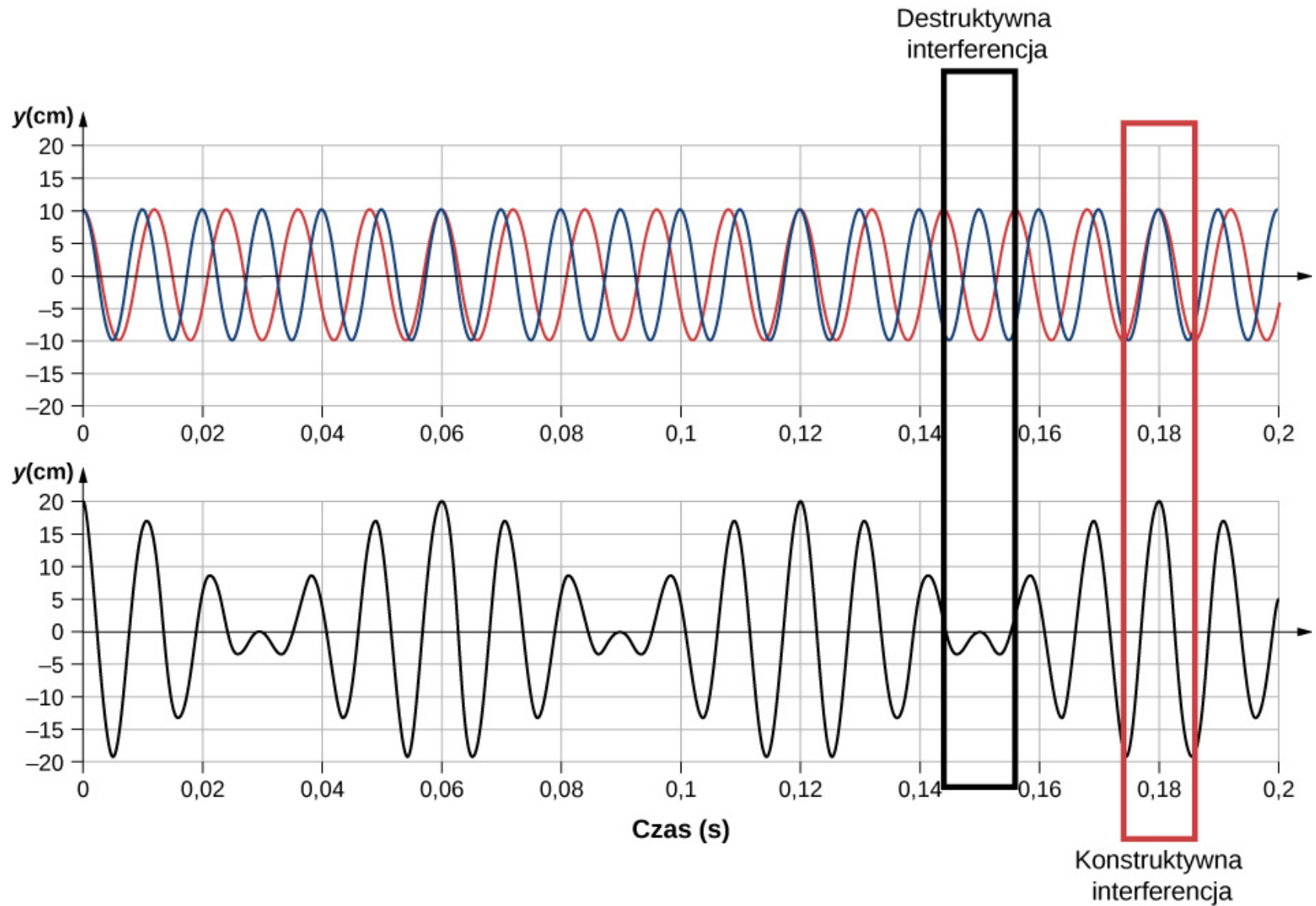
$$y(t) = 2A \cos(2\pi f_{\text{średnia}} t) \cos\left(2\pi \left(\frac{|f_2 - f_1|}{2}\right) t\right)$$

- w wyniku konstruktywnej i destrukcyjnej interferencji tych fal powstają tzw. dudnienia, dla których można określić częstotliwość:

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

- Dudnienia te mogą być pożyteczne np. dla stroicieli fortepianów.
- Gdy stroiciel dostraja struny fortepianu, słyszy dudnienia o malejącej częstotliwości wynikające z wyrównywania częstości struny z częstotliwością generowaną przez widełki stroikowe.

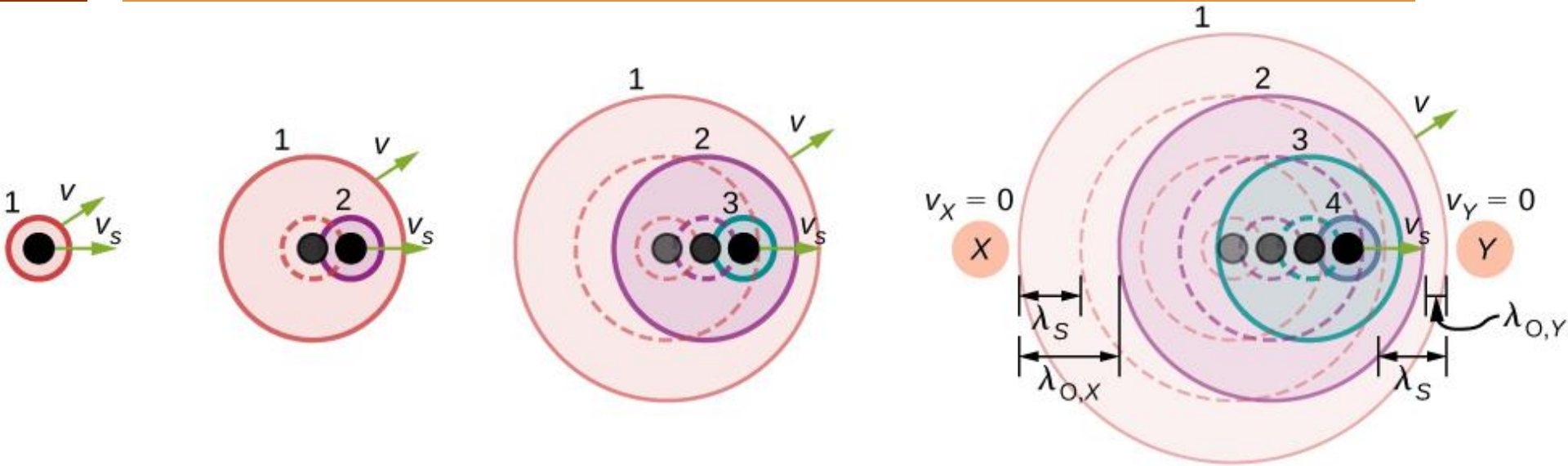
Dudnienia



Efekt Dopplera

- Rejestrowana przez obserwatora zmiana częstotliwości sygnału zbliżającej się i oddalającej się np. karetki pogotowia jest przykładem efektu Dopplera.
- Głośność dźwięku wzrasta, kiedy karetka zbliża się, i maleje, gdy karetka się oddala.
- Częstotliwość dźwięku syreny, który dociera do ucha obserwatora, rośnie, gdy karetka się zbliża, i maleje, gdy karetka się oddala, także wtedy, gdy syrena generuje dźwięk o stałej częstotliwości.
- Zmiany są najbardziej odczuwalne, gdy karetka mija obserwatora.
- Im szybciej karetka się porusza, tym większa jest zmiana częstotliwości syreny.
- **Efekt Dopplera** jest to zmiana odbieranej częstotliwości dźwięku w wyniku ruchu źródła dźwięku lub obserwatora.
- Andreas Doppler (1803–1853) przeprowadzał eksperymenty z ruchomymi źródłami i obserwatorami.
- Np. badał muzyków grających w otwartym pociągu, a także grających obok torów kolejowych, gdy pociąg przejeżdżał.
- Ich muzykę obserwowano zarówno w pociągu, jak i poza nim, mierząc przy tym zmiany częstotliwości.

Efekt Dopplera



- Źródło poruszające się ze stałą prędkością oddala się od obserwatora.
- Ruchome źródło wysyła fale dźwiękowe o stałej częstotliwości f_s (stałej długości fali λ_s), z prędkością dźwięku v .
- Obserwator słyszy dźwięk o długości fal λ_o .

$$\lambda_o = \lambda_s + \Delta x = \lambda_s + v_s T_s$$

$$f_o = f_s \left(\frac{v}{v \mp v_s} \right)$$

znak minus oznacza źródło przybliżające się do obserwatora, a znak plus oddalające się od obserwatora

Efekt Dopplera

Przesunięcie Dopplera

$$f_o = f_s \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right)$$

**Nieruchomy
obserwator**

**Obserwator poruszający
się w stronę źródła**

**Obserwator
oddalający się od
źródła**

Źródło nieruchome	$f_o = f_s$	$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v} \right)$	$f_o = f_s \left(\frac{v - v_o}{v} \right)$
Źródło poruszające się w stronę obserwatora	$f_o = f_s \left(\frac{v}{v - v_s} \right)$	$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right)$	$f_o = f_s \left(\frac{v - v_o}{v - v_s} \right)$
Źródło oddalające się od obserwatora	$f_o = f_s \left(\frac{v}{v + v_s} \right)$	$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v + v_s} \right)$	$f_o = f_s \left(\frac{v - v_o}{v + v_s} \right)$

Fale uderzeniowe

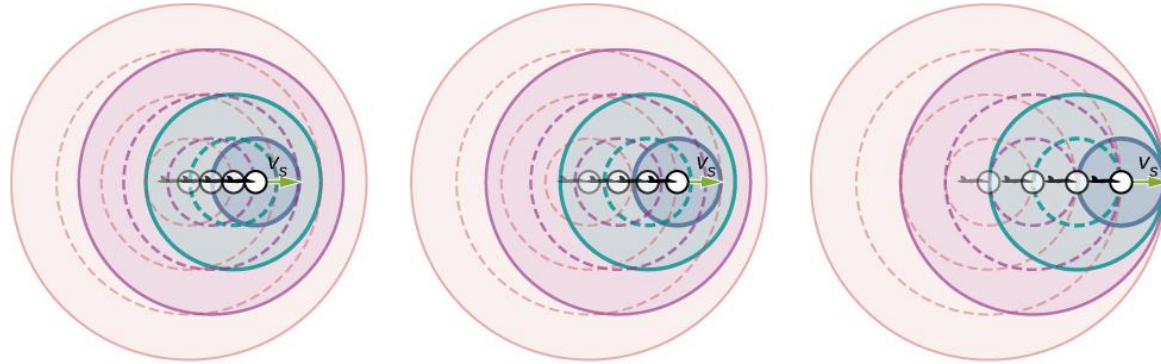
- Omawiając efekt Dopplera ruchomego źródła i obserwatora stacjonarnego, rozważaliśmy tylko przypadki, w których źródło poruszało się z prędkością mniejszą od prędkości dźwięku.
- W przypadku, gdy źródło porusza się w stronę obserwatora mierzona częstotliwość wynosi

$$f_o = f_s \left(\frac{v}{v - v_s} \right)$$

- Gdy źródło będzie się poruszać z prędkością dźwięku, to odbierana częstotliwość jest nieskończona.
- Jeśli źródło porusza się z prędkością większą niż prędkość dźwięku, rejestrowana częstotliwość jest ujemna.

Co to może oznaczać?

Fale uderzeniowe

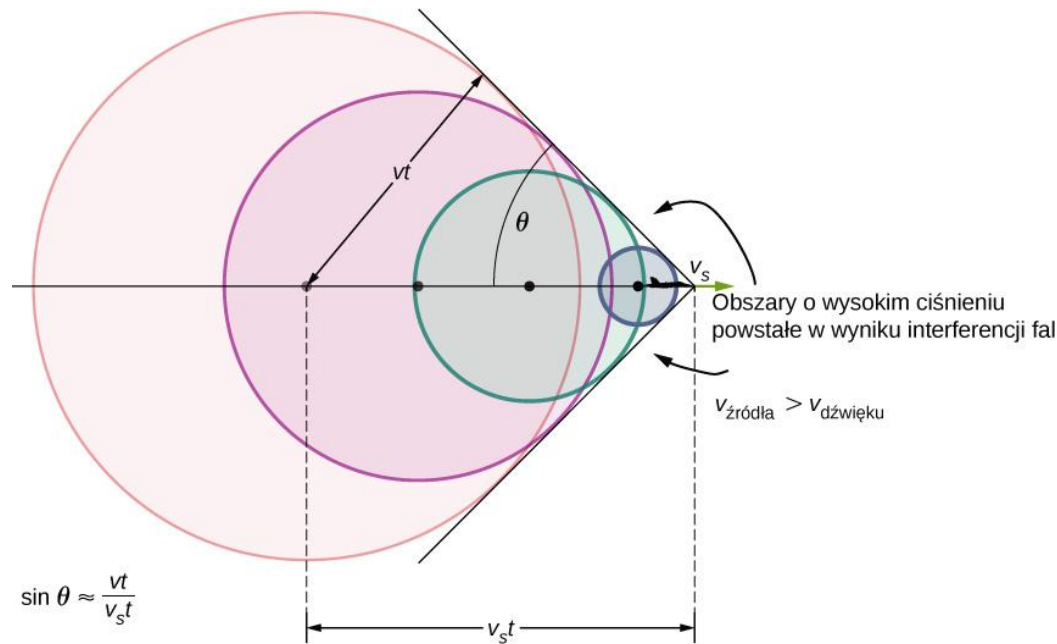


- Im szybciej porusza się źródło, tym wyższa jest rejestrowana częstotliwość.
- Jeśli źródło porusza się z prędkością dźwięku, każda fala oddziałuje z poprzednią, a obserwator słyszy je w tym samym momencie, więc częstotliwość jest nieskończona.

Fale uderzeniowe

- Jeśli źródło porusza się z prędkością większą niż prędkość dźwięku, obserwator usłyszy dźwięk dopiero, gdy źródło go minie.
- Wtedy docierający z opóźnieniem dźwięk zbliżającego się źródła, miesza się z dźwiękiem generowanym przez oddalające się źródło.
- Na wskutek nałożenia się tych fal zachodzi ciekawe zjawisko – powstaje fala uderzeniowa.

Fale uderzeniowe

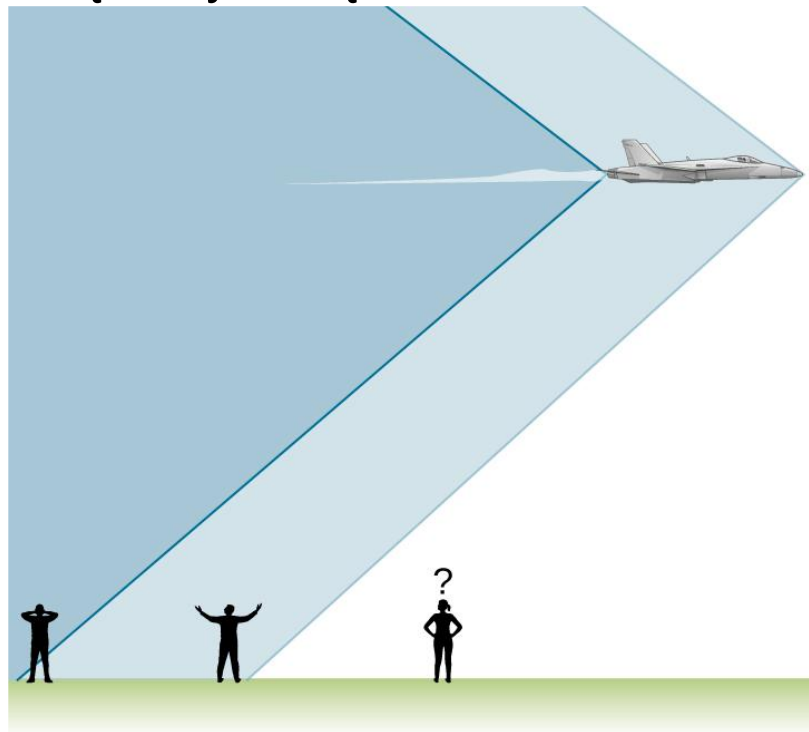


- Fale dźwiękowe generowane przez źródło propagują się z większą prędkością niż prędkość dźwięku rozprzestrzeniającego się sferycznie z punktu, w którym został wygenerowany, przy czym źródło oddala się od każdej z tych fal.
- Konstruktywna interferencja wzdłuż przedstawionych linii (stożka w trzech wymiarach) sprawia, że powstaje fala uderzeniowa.
- Im wyższa prędkość źródła, tym mniejszy kąt.

$$\sin \theta = \frac{v}{v_s} = \frac{1}{M}$$

Fale uderzeniowe

- Efekt dźwiękowy występuje, gdy fala uderzeniowa dociera do powierzchni ziemi.
- Samolot tworzy dwie fale uderzeniowe, przednią i tylną.
- Jeśli samolot leci na niskiej wysokości, ciśnienie gromu dźwiękowego może być niszczące, może na przykład wybić szyby.
- Ze względu na niszczycielskie działanie gromu dźwiękowego loty samolotów ponaddźwiękowych są zabronione nad terenami zaludnionymi.



Fale uderzeniowe

- Fale uderzeniowe są przykładem szerszego zjawiska nazywanego falami dziobowymi.
- Fala dziobowa tworzona jest, gdy źródło fali porusza się z większą prędkością niż prędkość fali.
- Fale wodne rozprzestrzeniają się w postaci kręgów od punktu, w którym się tworzą, a fala dziobowa ma kształt litery „V”, i podąża za źródłem.
- Bardziej skomplikowany kształt (łuk) tworzony jest, gdy cząstka elementarna przemieszcza się przez ośrodek szybciej niż prędkość światła w tym ośrodku.
- Jeśli cząstka powoduje emisję światła podczas swojego ruchu, to światło rozprzestrzenia się w postaci stożka pod kątem zależnym od prędkości cząstki.
- Taką falę dziobową nazywa się promieniowaniem Czerenkowa i jest to zjawisko często obserwowane w fizyce cząstek elementarnych.

Fale uderzeniowe



Niebieski blask w tym reaktorze badawczym to promieniowanie Czerenkowa, wywołane przez cząstki elementarne poruszające się z prędkościami większymi niż prędkość światła w wodzie.

Dziękuję za uwagę!