PROGRAM ROZWOJOWY
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Fale mechaniczne i akustyczne

Zadania z rozwiązaniami

KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Zadanie 1
Oblicz częstotliwość fali stojącej tworzącej się w rurze (o długości *l* = 34 cm) zamkniętej z jednej strony.

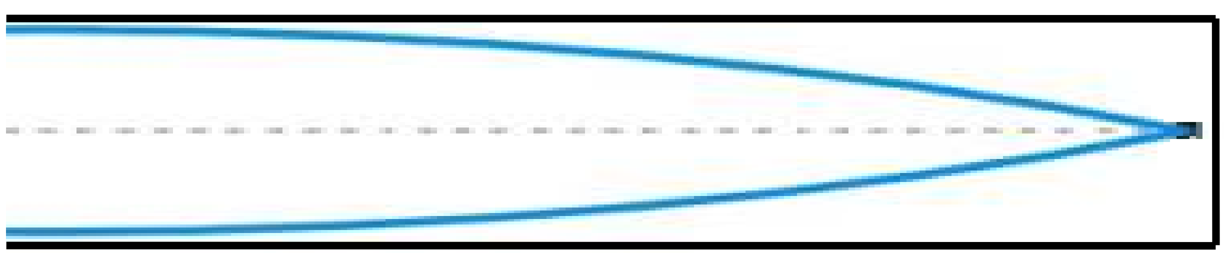
Fala stojąca powstaje w wyniku interferencji (nałożenia) co najmniej dwóch fal, np. biegnącej i odbitej. Falę stojącą cechuje niezmienniczość położenia maksimów amplitudy (tzw. strzałki) oraz miejsc całkowicie wygaszonych (tzw. węzły).

W rurze zamkniętej jednostronnie węzeł tworzy się przy krańcu zamkniętym, zaś strzałka – przy krańcu otwartym. Między nimi może pojawić się dowolna liczba strzałek. W naszym przypadku interesuje nas tylko największa długość fali.

Odległość między kolejnymi węzłami (lub, analogicznie, strzałkami) wynosi pół długości fali. Między sąsiadującym węzłem i strzałką mamy zatem odległość równą ¼ długości fali.

Dla największej długości fali, wewnątrz rury nie występuje żadna dodatkowa strzałka lub węzeł. Stąd największa długość generowanej fali wynosi:

$$\lambda_0 = 4l = 136cm \Rightarrow f_0 = \frac{\upsilon}{\lambda_0} = \frac{340m/s}{1{,}36m} = 250Hz$$



Zadanie 2
Jaka jest częstotliwość fali stojącej tworzącej się w rurze o długości *l* = 1 m, zamkniętej obustronnie? Jakie są częstotliwości kolejnych dwóch składowych harmonicznych?

W rurze zamkniętej dwustronnie węzeł tworzy się przy obu krańcach.

Dla największej długości fali, wewnątrz rury występuje tylko jedna strzałka pomiędzy węzłami na krańcach rury. Stąd największa długość generowanej fali wynosi:

$$\lambda_0 = 2l = 2m \Rightarrow f_0 = \frac{\upsilon}{\lambda_0} = 170Hz$$

Dla kolejnych harmonicznych:

$$\lambda_1 = 1l = 1m \Rightarrow f_1 = \frac{\upsilon}{\lambda_1} = 340Hz$$

$$\lambda_2 = \frac{2}{3}l = \frac{2}{3}m \Rightarrow f_2 = \frac{\upsilon}{\lambda_2} = 510Hz$$

Zadanie 3
Pręt w rurze Kundta ustawiono w ten sposób, że po potarciu pręta, w rurze wytworzyła się fala stojąca. Następnie pręt przesunięto o D*x* = 10 cm i ponownie otrzymano falę stojącą. Jaka jest długość wprawianego w drgania pręta?

Rura Kundta stanowi rezonator, zamknięty z jednej strony na stałe. Z drugiej strony rurę domyka zakończenie ruchomego pręta. Pręt, wprawiony w drgania, generuje falę o dwukrotnej długości jego samego. Przesuwanie pręta umożliwia zaobserwowanie w pewnych położeniach fali stojącej – przy spełnieniu warunków opisanych w rozwiązaniu poprzedniego zadania.

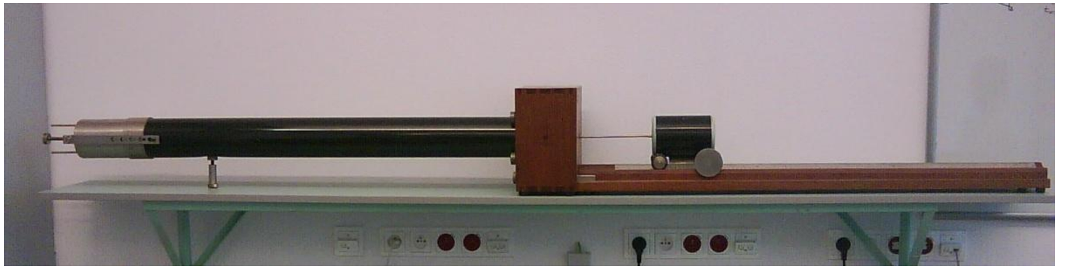
Aby zaobserwować falę stojącą, końcówka pręta musi znajdować się w miejscu „przypadającym" na węzeł fali. Przesunięcie pręta od jednego rezonansu do drugiego (najsilniejszej obserwacji fali) równe jest zatem odległości między kolejnymi węzłami.

Stąd długość otrzymanej w naszym przypadku fali wynosi:

$$\lambda_0 = 2\Delta x = 20cm$$

Zaś długość pręta (*d*):

$$d = \lambda_0 / 2 = \Delta x = 10cm$$



Laboratoryjna rura Kundta – fot. Grzegorz Knor (licencja: własność publiczna)

Zadanie 4
Oblicz częstotliwość podstawową struny o długości *l* = 20 cm i masie *m* = 100 g, jeśli naprężenie struny wynosi *F* = 8 N.

Prędkość fali mechanicznej, rozchodzącej się w strunie, wynosi:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

gdzie $\mu = m/l$ – gęstość liniowa struny.

Pamiętamy, że dla fali stojącej „zakotwiczonej” na obu końcach musi być spełniony warunek:

$$f_0 = \frac{2\upsilon}{l} = \frac{2}{l} \cdot \sqrt{\frac{Fl}{m}} = 2\sqrt{\frac{F}{ml}}$$

Podstawiając wartości liczbowe, otrzymamy:

$$f_0 = 40 Hz$$

Zadanie 5
Natężenie dźwięku w odległości l_1 = 1 m od głośnika (emitującego falę kulistą) wynosi I_1 = 0,8 W/m^2. Jaka jest moc głośnika? Jaki jest poziom natężenia dźwięku w odległości l_2 = 2 m?

Natężenie dźwięku rozchodzącego się w postaci fali kulistej z punktowego źródła o mocy *P* maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości *r* i wyraża się zależnością:

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Znając natężenie w punkcie odległym o l_1, łatwo możemy obliczyć moc źródła (*P*):

$$I_1 = \frac{P}{4\pi l_1^2} \Rightarrow P = 4\pi l_1^2 I_1 \approx 10{,}05W$$

Przez analogię, policzymy natężenie dźwięku w punkcie odległym o l_2:

$$I_2 = \frac{P}{4\pi l_2^2} \Rightarrow \frac{4\pi l_1^2 I_1}{4\pi l_2^2} = I_1 \cdot \frac{l_1^2}{l_2^2} = 0{,}2\frac{W}{m^2}$$

Poziom natężenia dźwięku jest logarytmiczną miarą natężenia dźwięku w stosunku do pewnej umownie przyjętej wartości odniesienia (I_0 = 10^{-12} W/m^2), wyrażaną w decybelach:

$$L = 10\log_{10}(I/I_0)[dB]$$

Poziom natężenia dźwięku w punkcie odległym o l_2 wynosi zatem:

$$L_2 = 10\log_{10}(I_2/I_0) = 10\log_{10}(2\cdot 10^{11}) = 113dB$$

Zadanie 6

O ile wzrośnie poziom natężenia dźwięku w pewnym stałym punkcie, jeśli moc głośnika zwiększymy 2 razy?

Niech natężenie dźwięku w pewnym punkcie wynosi:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Po dwukrotnym zwiększeniu mocy głośnika, natężenie dźwięku w tym samym punkcie wyniesie:

$$I_2 = \frac{2P}{4\pi r^2} = 2I_1$$

Natomiast poziom natężenia dźwięku w tym punkcie wyniesie:

$$L_2 = 10\log_{10}\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10\log_{10}\left(2\frac{I_1}{I_0}\right) = 10\left[\log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + \log_{10}(2)\right]$$

$$L_2 = L_1 + 10\log_{10}(2) = L_1 + 3dB$$

Odp. Po dwukrotnym zwiększeniu mocy głośnika, poziom natężenia dźwięku wzrósł o 3 dB.

Zadanie 7

Poziom natężenia dźwięku w odległości r_1 = 0,1 m od wybuchającej petardy wyniósł L_1 = 140 dB. Ile wynosił promień (R) obszaru, w którym wybuch mógł być słyszalny (tj. L > 0)?

Poziom natężenia dźwięku w punkcie odległym o r od miejsca wybuchu wynosi

$$L(r) = 10\,log_{10}\left(\frac{I(r)}{I_0}\right) = 10\,log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\cdot\frac{r_1^2}{r^2}\right) = 10\,log_{10}\left(\frac{I_1}{I_0}\right) + 10\,log_{10}\left(\frac{r_1^2}{r^2}\right)$$

$$L(r) = L_1 + 10\,log_{10}\left(\frac{r_1^2}{r^2}\right)$$

Wystarczy rozwiązać teraz nierówność $L(r) > 0$, co prowadzi do następujących wniosków:

$$10\,log_{10}\left(\frac{r_1^2}{r^2}\right) + L_1 > 0 \Rightarrow log_{10}\left(\frac{r_1^2}{r^2}\right) > -\frac{L_1}{10} \Rightarrow \frac{r_1^2}{r^2} > 10^{-L_1/10}$$

Ostatecznie otrzymujemy:

$$r^2 < r_1^2 \cdot 10^{L_1/10} \Rightarrow r < r_1 \cdot 10^{L_1/20} = 1000km$$

Odp. Wybuch petardy mógł być słyszalny w promieniu R = 1000 km.

Zadanie 8

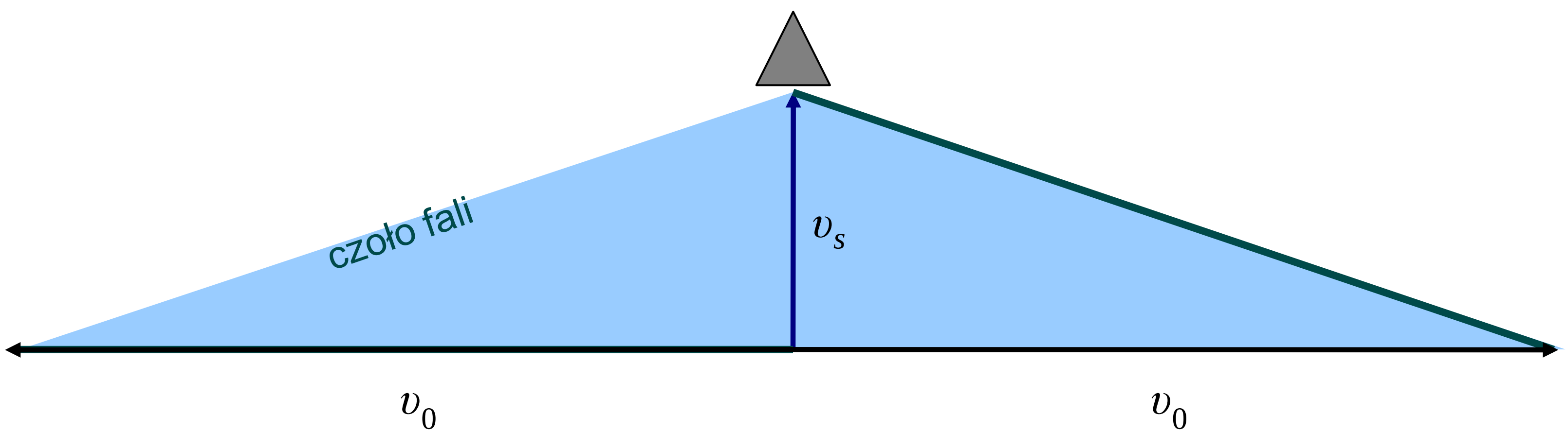
Z jaką prędkością poruszał się samolot, jeśli kąt rozwarcia stożka będącego czołem fali akustycznej emitowanej przez niego, wynosił 120º. Prędkość dźwięku wynosi v_0 .

Lecący samolot w każdej chwili jest źródłem fali kulistej, poruszającej się z prędkością dźwięku (υ_0) w danym ośrodku. Superpozycja wszystkich tych fal tworzy falę, której czoło stanowi powierzchnia stożka. Obserwując rozchodzenie się fali można zauważyć, że kąt rozwarcia stożka zależy od stosunku prędkości dźwięku i prędkości samolotu:

$$tg\frac{\alpha}{2} = \frac{\upsilon_0}{\upsilon_s}$$

Stąd prędkość samolotu wynosi:

$$\upsilon_s = \frac{\upsilon_0}{tg\frac{\alpha}{2}} = \frac{\upsilon_0}{\sqrt{3}} \approx 0{,}58\upsilon_0$$



Zadanie 9

W drgania wprawiono dwa kamertony: o częstotliwości f_0 = 100 Hz oraz nieco rozstrojony o częstotliwości f_1 = 101 Hz. Oblicz częstotliwość dudnienia dźwięku wytwarzanego przez oba przyrządy.

Zakładając, że oba kamertony generują falę akustyczną o tej samej amplitudzie, możemy zapisać wyrażenia na falę w miejscu równoodległym od obu przyrządów:

$$x_0(t) = A\sin\left(2\pi f_0 t\right) \qquad x_1(t) = A\sin\left(2\pi f_1 t\right)$$

Wychylenie fali, będącej interferencją obu fal, zapisujemy jako sumę powyższych:

$$x(t) = x_0(t) + x_1(t) = A\left[\sin\left(2\pi f_0 t\right) + \sin\left(2\pi f_1 t\right)\right]$$

Korzystając ze wzoru trygonometrycznego na sumę sinusów, otrzymujemy:

$$x(t) = 2A\left[sin\left(2\pi\frac{f_0+f_1}{2}t\right)\cdot cos\left(2\pi\frac{f_1-f_0}{2}t\right)\right]$$

$$x(t) = 2A\left[sin(100{,}5Hz\cdot 2\pi t)\cdot cos(0{,}5Hz\cdot 2\pi t)\right] = \underbrace{2A\,cos(0{,}5Hz\cdot 2\pi t)}_{\text{modulowana amplituda}}\cdot sin(100{,}5Hz\cdot 2\pi t)$$

Widzimy, że w efekcie otrzymujemy falę akustyczną o uśrednionej częstotliwości 100,5 Hz, modulowaną tzw. dudnieniami o częstotliwości 0,5 Hz. Dudnienie obserwuje się także w sytuacji, gdy amplitudy obu fal akustycznych są różne.

Zadanie 10
Nieruchomy obserwator zmierzył częstotliwość dźwięku sygnału karetki pogotowia, zbliżającej się do niego z prędkością υ = 72 km/h. Wynosiła ona f_1 = 500 Hz. Ile wyniesie mierzona częstotliwość sygnału karetki, która – minąwszy obserwatora – zacznie się od niego oddalać?

Na skutek ruchu źródła dźwięku względem spoczywającego obserwatora, następuje zmiana rejestrowanej częstotliwości fali, w stosunku do częstotliwości generatora (np. głośnika karetki) f_0.

Gdy karetka zbliża się, częstość f_1 jest większa niż f_0 :

$$f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0}{\upsilon_0 - \upsilon}$$

Podobnie, gdy karetka się oddala, obserwowany jest przeciwny efekt – f_2 jest mniejsza niż f_0 :

$$f_2 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0}{\upsilon_0 + \upsilon}$$

Ponieważ nie znamy częstotliwości generatora, możemy ją wyrugować, przekształcając powyższe równania:

$$f_2 = f_1 \cdot \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0} \cdot \frac{\upsilon_0}{\upsilon_0 + \upsilon} = f_1 \cdot \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0 + \upsilon}$$

Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy:

$$f_2 = 500Hz \cdot \frac{340m/s - 20m/s}{340m/s + 20m/s} \approx 444Hz$$

Zadanie 11
Oblicz częstotliwość fali światła linii sodu o długości λ = 580 nm.

Prędkość światła (*c*), jej częstotliwość (*n*) oraz długość (λ) związane są bardzo prostą zależnością:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Podstawiając wartości liczbowe, natychmiast otrzymujemy:

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}}{580 \cdot 10^{-9} m} = 0{,}51 \cdot 10^{15} Hz$$

Jest to, w przybliżeniu, pół miliona gigaherców!

Zadanie 12
Częstotliwość generatora w kuchence mikrofalowej wynosi *f* = 2,45 GHz. Oblicz długość wytwarzanych w ten sposób mikrofal.

Długość mikrofal – jak wszystkich innych fal elektromagnetycznych – możemy wyznaczyć ze wzoru:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Wstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}}{2{,}45 \cdot 10^{9}\,Hz} = 1{,}22 \cdot 10^{-1}\,m \approx 12\,cm$$

W kuchence mikrofalowej generowana jest fala stojąca o obliczonej długości. Gdyby potrawy nie obracały się na talerzu, w odległości ok. 6 cm (dlaczego?) powstawałyby obszary nagrzane, podczas gdy pomiędzy nimi potrawa byłaby chłodna.

Zadanie 13
Wykaż, że natężenie pola elektrycznego fali płaskiej spełnia równanie falowe.

Natężenie pola elektrycznego fali płaskiej wyraża się wzorem:

$$E(x,t) = E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right]$$

Każda fala elektromagnetyczna (jednowymiarowa) musi spełniać następujące równanie:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E = 0$$

Obliczamy kolejne pochodne natężenia pola elektrycznego względem położenia *x* i czasu *t*:

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = -ikE_0 \exp[i\left(\omega t - kx\right)] \qquad \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial x^2} = -k^2 E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right]$$

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = i\omega E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right] \qquad \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial t^2} = -\omega^2 E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right]$$

Ponadto zachodzi wzajemna zależność wektora falowego, częstości kołowej i prędkości światła: $k = \frac{\omega}{c}$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)E = -k^2 E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right] + \frac{\omega^2}{c^2} E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right] = \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k^2\right)E_0 \exp\left[i\left(\omega t - kx\right)\right] = 0$$

PROGRAM ROZWOJOWY
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Fale elektromagnetyczne

Zadania z rozwiązaniami

KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

Zadanie 14

Natężenie oświetlenia na chodniku pod latarnią uliczną wynosi E_0 = 500 lx. Ile wynosi natężenie oświetlenia na chodniku w miejscu, w którym promienie padają pod kątem 45°?

Natężenie oświetlenia zależy od natężenia źródła, kwadratu odległości od niego i kąta, pod jakim padają promienie światła:

$$E(r) = \frac{I}{r^2}\cdot\cos\alpha$$

W naszym przypadku natężenie oświetlenia pod latarnią wynosi:

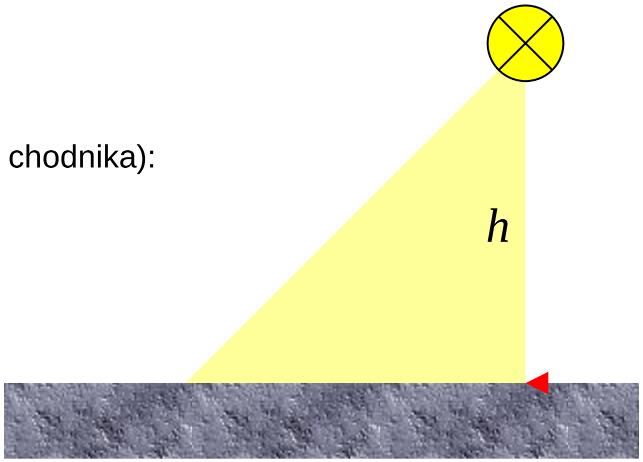
$$E_0 = \frac{I}{h^2}\cdot\cos 0 = \frac{I}{h^2}$$

Zaś w miejscu, gdzie promienie padają pod kątem β (liczonym od powierzchni chodnika):

$$E = \frac{I}{r^2}\cdot\cos\left(90^\circ - \beta\right)$$

Z podstawowych zależności trygonometrycznych dostajemy, iż:

$$\frac{h}{r} = \sin\beta \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{\sin\beta}{h}$$



Zatem:

$$E = \frac{I\sin^2\beta}{h^2}\cdot\cos\left(90^\circ - \beta\right) = E_0\sin^2\beta\cdot\cos\left(90^\circ - \beta\right) = 500lx\cdot\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}} = 250\sqrt{2}lx \approx 354lx$$

Zadanie 15
Światło z małej żarówki o natężeniu światła I = 1 lm jest skupiane przez soczewkę o ogniskowej f = 10 cm znajdującej się w odległości $x = 2f$ od żarówki. Ile wynosi natężenie oświetlenia w punkcie X, odległym od żarówki o l = 50 cm? Żarówka i punkt X znajdują się na osi optycznej soczewki.

Oświetlenie punktu X możemy obliczać tak, jakby oświetlał go obraz rzeczywisty żarówki, powstający w wyniku skupienia promieni przez soczewkę. Położenie obrazu wyznaczymy z równania soczewki:

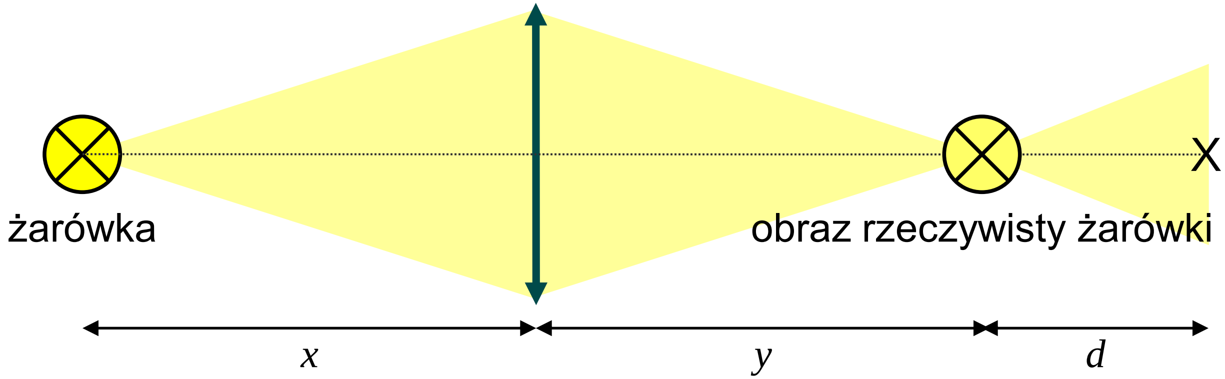
$$\frac{1}{f}=\frac{1}{x}+\frac{1}{y}\Rightarrow\frac{1}{y}=\frac{1}{f}-\frac{1}{x}=\frac{1}{f}-\frac{1}{2f}=\frac{1}{2f}\Rightarrow y=2f$$

Odległość d obrazu rzeczywistego żarówki od punktu X obliczymy następująco:

$$d=l-x-y=l-4f$$

Natężenie oświetlenia w punkcie X wynosi zatem:

$$E=\frac{I}{d^2}\cdot\cos 0=\frac{I}{(l-4f)^2}=\frac{1lm}{100cm^2}=100lx$$



Zadanie 16
Wiązka lasera o długości fali λ = 400 nm pada prostopadle na powierzchnię płyty CD i ulega dyfrakcji. Oblicz kąt, pod którym obserwowane jest maksimum pierwszego rzędu, jeśli odległość między ścieżkami na płycie wynosi d = 1,6 mm.

Płytę CD możemy traktować jak odbiciową siatkę dyfrakcyjną, o odległości między szczelinami wynoszącej *d*. Wystarczy zatem zastosować równanie siatki dyfrakcyjnej dla maksimum pierwszego rzędu (tj. n = 1):

$$d \sin\theta = n\lambda$$

$$\sin\theta_1 = \frac{\lambda}{d} = \frac{400nm}{1600nm} = \frac{1}{4}$$

Znając wartość sinusa, obliczamy wartość kąta:

$$\theta_1 = \arcsin\tfrac{\lambda}{d} = \arcsin\tfrac{1}{4} \approx 14{,}5^\circ$$

Zadanie 17

Jaką długość mają tęcze maksimów pierwszego rzędu wytworzone na ekranie znajdującym się w odległości *l* = 1 m od siatki dyfrakcyjnej mającej 100 nacięć na mm, kiedy pada na nią prostopadle światło słoneczne?

Odległość między szczelinami siatki dyfrakcyjnej jest odwrotnością liczby nacięć na mm:

$$d = \frac{1}{100} mm = 0{,}01 mm = 10000 nm$$

Obliczamy teraz kąty, pod jakimi uginają się skrajne długości fal tęczy: czerwony ($\lambda_{\chi z}$ = 750 nm) i fioletowy (λ_f = 380 nm):

$$\sin\theta_{cz} = \frac{\lambda_{cz}}{d} = \frac{750nm}{10000nm} = 0{,}075 \Rightarrow \theta_{cz} \approx 0{,}075 rad$$

$$\sin\theta_{f} = \frac{\lambda_{f}}{d} = \frac{380nm}{10000nm} = 0{,}038 \Rightarrow \theta_{f} \approx 0{,}038 rad$$

Długość tęczy (*x*) na ekranie możemy, w przybliżeniu, wyznaczyć jako długość łuku o kącie łukowym będącym różnicą kątów, pod jakimi obserwowane są maksima dyfrakcyjne skrajnych kolorów tęczy:

$$x \approx l \cdot \left(\theta_{cz} - \theta_f\right) = 1m \cdot \left(0{,}075 - 0{,}038\right) = 0{,}037m = 37mm$$

Otrzymana w ten sposób tęcza może być doskonale obserwowana okiem nieuzbrojonym.

Zadanie 18
Promień czerwonego lasera o długości fali λ = 650 nm pada na włos, w wyniku czego obserwujemy na ekranie, odległym o *l* = 1 m od włosa, maksima dyfrakcyjne. Oszacuj grubość włosa (*d*), jeśli odległość maksimum pierwszego od zerowego rzędu wynosi *x* = 10 mm.

Promień lasera ulega ugięciu na krawędziach włosa i interferuje sam ze sobą, w wyniku czego na ekranie otrzymujemy maksima, zupełnie jak w przypadku „prawdziwej" siatki dyfrakcyjnej. Ich położenia spełniają warunek:

$$d\sin\theta_n = n\lambda \Rightarrow d = \frac{\lambda}{\sin\theta_1}$$

Stosując przybliżenie małych kątów otrzymujemy:

$$\sin\theta_1 \approx tg\theta_1 = \frac{x}{l}$$

$$d \approx \frac{\lambda l}{x} = \frac{650nm\cdot 1m}{0{,}01m} = 65\mu m$$

Zadanie 19
Ile wynosi minimalny kąt całkowitego wewnętrznego odbicia dla granicy ośrodków powietrze-woda?

Promień światła, przechodząc przez granicę ośrodków o różnym współczynniku załamania *n*, ulega załamaniu zgodnie z prawem Snelliusa:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

Całkowite wewnętrzne odbicie zachodzi w przypadku takiego kąta padania, dla którego musiałby być spełniony poniższy warunek, co jest możliwe tylko wtedy, gdy światło przechodzi z ośrodka o większym współczynniku załamania:

$$\sin\theta_2 > 1$$

Dla granicy ośrodków woda (n_1 = 1,33) – powietrze (n_2 = 1) mamy:

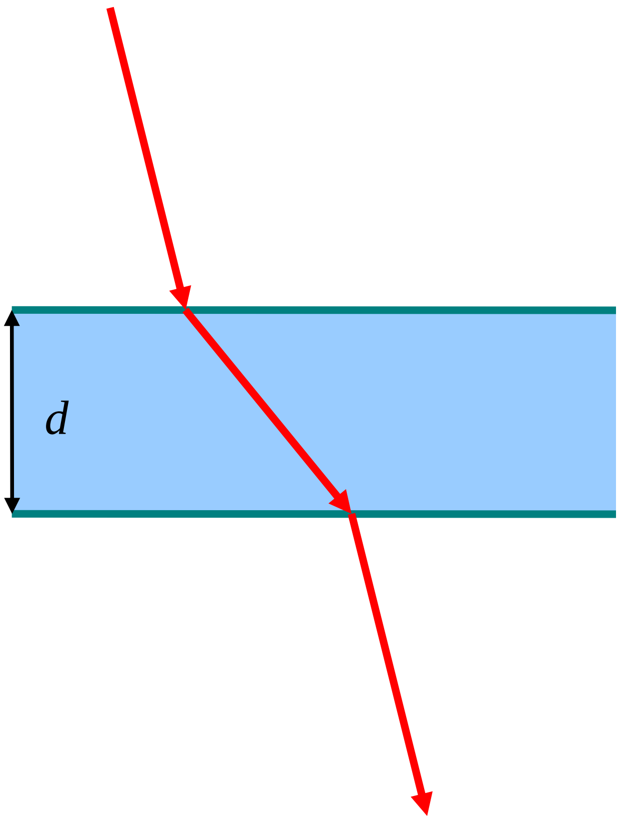
$$n_1 \sin\theta_1 = \sin\theta_2 > 1 \Rightarrow \sin\theta_1 > 1/n \approx 0{,}752$$

$$\theta_1 > \arcsin \, {}^{1}\!/_{n_1} = 48{,}75^\circ$$

Zadanie 20
Promień lasera pada na płaskorównoległą płytkę szklaną (n = 1,5) pod kątem α = 30º. Ile wynosi czas biegu promienia we wnętrzu płytki, jeśli jej grubość wynosi d = 10 mm.

Korzystając z prawa załamania światła, obliczamy sinus kąta (β), pod którym porusza się promień wewnątrz płytki:

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n}$$



Z podstawowych związków trygonometrycznych, droga pokonywana przez promień w płytce wynosi:

$$\frac{d}{l} = \cos\beta \Rightarrow l = \frac{d}{\cos\beta} = \frac{d}{\sqrt{1-\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right)^2}}$$

Pamiętając, że prędkość światła w ośrodku zależy od współczynnika załamania, otrzymujemy czas przelotu:

$$t = \frac{l}{\upsilon} = \frac{nd}{c\sqrt{1-\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right)^2}} \approx 0{,}53 \cdot 10^{-10} s = 53 ps$$

Zadania do samodzielnego rozwiązania

Fale mechaniczne i akustyczne

11. Rura, zamknięta z jednej strony, została wprawiona w drgania. Wyznacz najmniejszą możliwą długość rury, jeśli emituje ona dźwięk o częstotliwości f = 125 Hz. (*Odp. 68 cm*)
12. Zamkniętą z jednej strony rurę wprawiono w drgania o częstotliwości f. Następnie zakryto jej drugi koniec. Jaką częstotliwość dźwięku wydaje teraz rura? (*Odp. 2f*)
13. Pręt w rurze Kundta ustawiono w ten sposób, że po potarciu pręta, w rurze wytworzyła się fala stojąca. O ile należy przesunąć pręt w rurze, aby „natrafić” na kolejny rezonans, jeśli długość pręta wynosi l = 20 cm. (*Odp. 20 cm*)
14. Jak należy zmienić naprężenie metalowej struny, aby podstawowa częstotliwość wzrosła o oktawę (tj. dwukrotnie)? (*Odp. Zwiększyć czterokrotnie*)
15. Ile wynosi natężenie dźwięku w odległości l_1 = 1 m od głośnika (emitującego falę kulistą) o mocy P = 12,57 W? Jaki jest poziom natężenia dźwięku w odległości l_2 = 5 m? (*Odp.* 1 W/m^2, 106 dB)
16. O ile zwiększono moc głośnika, jeśli poziom natężenia dźwięku w pewnym stałym punkcie wzrósł o 5 dB? (*Odp*. $\sqrt{10}$)
17. Wybuch wulkanu Krakatau w 1883 r. był słyszalny w promieniu 5000 km. Ile wynosił poziom natężenia dźwięku w odległości 500 m od wybuchu wulkanu? (*Odp. 80 dB*)
18. Ile wynosi kąt rozwarcia stożka będącego czołem fali akustycznej emitowanej przez samolot poruszający się z prędkością 1/3 macha? Mach - stosunek prędkości obiektu do prędkości dźwięku w danym środowisku. (*Odp.* 143º)
19. Po założeniu metalowej obrączki na jedno z ramion kamertonu (o częstotliwości własnej f_0 = 250 Hz), zaobserwowano dudnienia o częstotliwości f_d = 1 Hz. Ile wynosiła częstotliwość drgań rozstrojonego ramienia kamertonu? (*Odp. 248 Hz*)
20. Od chwili zobaczenia błysku do usłyszenia grzmotu minęło 10 sekund. W jakiej odległości od obserwatora uderzył piorun? (*Odp. 3,4 km*)

Fale elektromagnetyczne

21. Ile wynosi długość fali elektromagnetycznej, odpowiadająca częstotliwości 10^{15} Hz? (*Odp. 300 nm*)
22. Częstotliwość generatora w kuchence mikrofalowej wynosi f = 2,45 GHz. Ile wynosi odległość pomiędzy kolejnymi strzałkami fali stojącej, tworzącej się w kuchence? (*Odp. Ok. 6 cm*)
23. Ile wynosi długość oraz prędkość rozchodzenia się fali lasera czerwonego (l = 650 nm), który został wprowadzony do ośrodka o współczynniku załamania n = 1,5? (*Odp. 2/3 c, 975 nm*)
24. Wykaż, że indukcja pola magnetycznego fali płaskiej spełnia równanie falowe.
25. Dwie żarówki (jedna czterokrotnie jaśniejsza od drugiej) umieszczono w odległości l = 30 cm, a pomiędzy nimi umieszczono kartkę. W jakiej odległości od jaśniejszej żarówki należy umieścić kartkę, aby natężenie oświetlenia po obu stronach było takie samo? (*Odp. 20 cm*)
26. W połowie odległości między żarówką i lustrem umieszczono kartkę papieru. Jaki jest stosunek natężenia światła padającego na kartkę bezpośrednio oraz odbitego przez zwierciadło? (*Odp. 9:1*)
27. Wiązka lasera o długości fali λ = 650 nm pada prostopadle na powierzchnię płyty DVD i ulega dyfrakcji. Maksimum pierwszego rzędu obserwowane jest pod kątem 61,5º. Oblicz odległość między ścieżkami na płycie. (*Odp. 740 nm*)
28. Ile wynosi maksymalny rząd prążka dyfrakcyjnego, jaki można otrzymać oświetlając siatkę dyfrakcyjną o stałej sieci d = 5 mm promieniem lasera o długości λ = 650 nm? (*Odp. 7*)
29. Promień czerwonego lasera o długości fali λ = 650 nm pada na szczelinę śruby mikrometrycznej rozsuniętą o d = 0,05 mm, w wyniku czego obserwujemy na ekranie maksima dyfrakcyjne. W jakiej odległości od maksimum zerowego jest obserwowane na ekranie maksimum pierwszego rzędu? Ekran oddalony jest od śruby o l = 1 m. (*Odp. 13 mm*)
30. W naczyniu z wodą (n = 1,33), tuż pod jej powierzchnią, znajduje się świecący poziomo laser. Ile wynosi minimalne przyspieszenie balii, przy którym promieniowi lasera uda się opuścić ośrodek? Wskazówka: powierzchnia wody ustawia się prostopadle do wypadkowej siły działającej na nią w układzie nieinercjalnym. (*Odp. 0,88 g*)