

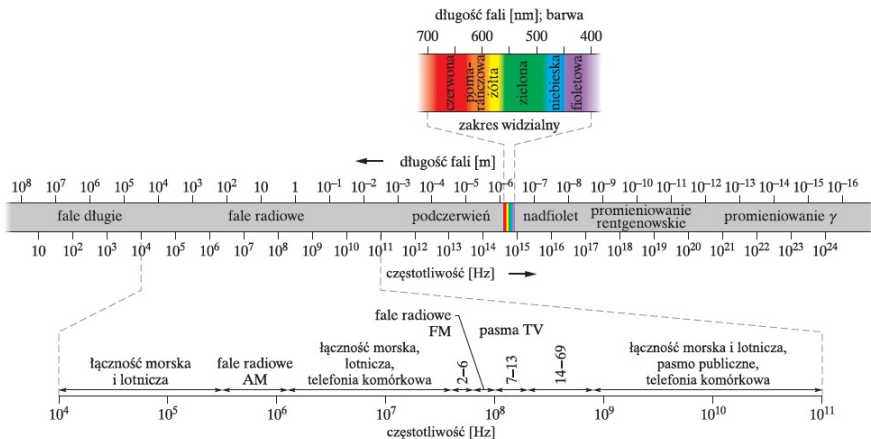
9. Fale elektromagnetyczne

Rzeszów University of Technology

18 maja 2023

- D. Halliday, R. Resnik, J. Walker. Podstawy fizyki, tom 4.
- Fizyka dla szkół wyższych, tom 2. Openstax Polska.
- L.D. Landau, J.M. Lifszyc. Teoria pola.
- H.D. Young, R.A. Freedman. University Physics.
- F.C. Crawford. Fale (Kurs fizyki Berkeley, tom 3)

Fale elektromagnetyczne



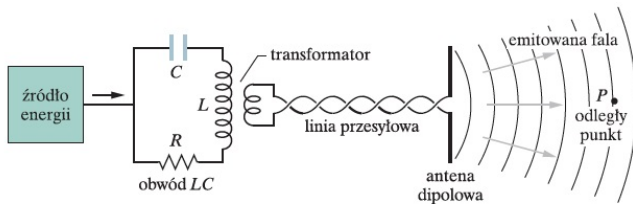
Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Pole elektryczne i magnetyczne w fali

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

gdzie $E_m/B_m = c$ i w każdy moment czasu $E/B = c$, $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ - prędkość rozchodzenia się fali (prędkość światła).



Tworzenie fali elektromagnetycznej w obwodzie RLC

Prawo indukcji Faradaya

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (E + dE)h - Eh = hdE$$

$$\Phi_B = B(hdx)$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = hdx \frac{dB}{dt}$$

$$hdE = -hdx \frac{dB}{dt}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

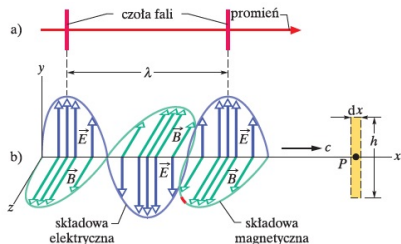
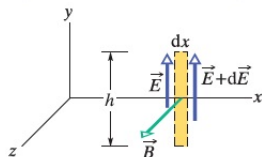
$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$kE_m \cos(kx - \omega t) = \omega B_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = c, \quad \omega = ck$$

oscylujące pole magnetyczne indukuje oscylujące, prostopadłe pole elektryczne



Uogólnione prawo Ampère'a

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = -(B + dB)h + Bh = -hdB$$

$$\Phi_E = E(hdx)$$

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = hdx \frac{dE}{dt}$$

$$-hdB = \mu_0 \epsilon_0 \left(hdx \frac{dE}{dt} \right)$$

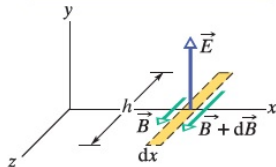
$$\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$-kB_m \cos(kx - \omega t) = -\mu_0 \epsilon_0 \omega E_m \cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 (\omega/k)} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0 c}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

oscylujące pole elektryczne
indukuje oscylujące,
prostopadłe pole magnetyczne



Wektor Poyntinga:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

Jednostki

$$S = \left(\frac{\text{energia/czas}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{chw} = \left(\frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{chw}$$

Chwilowa szybkość przepływu energii

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB = \frac{E^2}{c\mu_0} \quad (B = E/c)$$

Kierunek wektora Poyntinga fali elektromagnetycznej jest kierunkiem rozchodzenia się fali i przepływu energii

$$I = S_{sr} = \left(\frac{\text{energia/czas}}{\text{pole powierzchni}} \right)_{sr} = \frac{\text{moc}}{\text{pole powierzchni}} \Big|_{sr}$$

$$I = S_{sr} = \frac{(E^2)_{sr}}{c\mu_0} = \frac{1}{c\mu_0} = \frac{E_m^2}{2c\mu_0} \quad (E_{sr,kw} = E_m/\sqrt{2})$$

gdzie I - natężenie promieniowania

Fale elektromagnetyczne przenoszą energię i pęd.

W czasie Δt ciało uzyskuje od promieniowania energię ΔU .

Zmiana pędu Δp ciała jest związana ze zmianą energii.

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} \text{ - przy całkowitej absorpcji}$$

$$\Delta p = \frac{2\Delta U}{c} \text{ - jeżeli promieniowanie zostanie całkowicie odbite}$$

Energia, która dociera do płaszczyzny o polu S w czasie Δt

$$\Delta U = IS\Delta t$$

gdzie I - natężenie promieniowania

Siła, która działa na element powierzchni S : $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

Dostajemy wyrażenia dla ciśnienia promieniowania ($p_p = \frac{F}{S}$)

$$p_p = \frac{I}{c} \text{ - całkowita absorpcja}$$

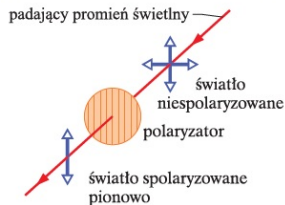
$$p_p = \frac{2I}{c} \text{ - całkowite odbicie promieniowania}$$

Płaszczyznę, w której leżą wektory \vec{E} nazywamy **płaszczyzną drgań fali**

Niespolaryzowane światło: nałożenie fal, w których wektory \vec{E} leżą we wszystkich możliwych płaszczyznach wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali

Światło niespolaryzowane przepuszczone przez polaryzator:

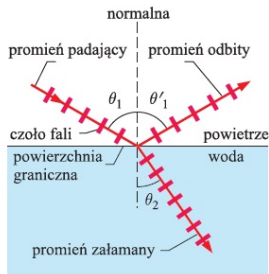
polaryzator z pionowym kierunkiem polaryzacji; światło, które przeszło przez polaryzator, jest spolaryzowane pionowo



Prawo odbicia światła:

$$\theta'_1 = \theta_1$$

Promień odbity leży w płaszczyźnie padania, a kąt odbicia jest równy kątowi padania



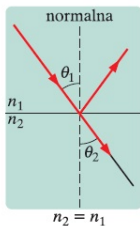
Prawo załamania światła:

Promień załamany leży w płaszczyźnie padania, a kąt załamania θ_2 jest związany z kątem padania θ_1 zależnością

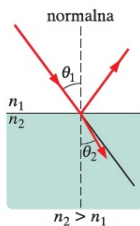
$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad \text{"prawo sinusów"}$$

gdzie n_1 i n_2 – bezwymiarowe **współczynniki załamania światła**

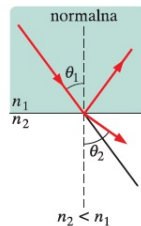
jeżeli współczynniki załamania są sobie równe, kierunek promienia nie zmienia się



jeżeli współczynnik załamania drugiego ośrodka jest większy, promień załamuje się do normalnej

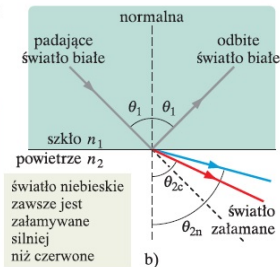
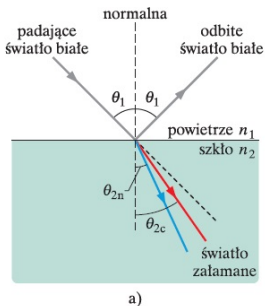
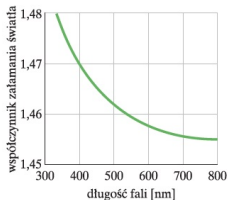
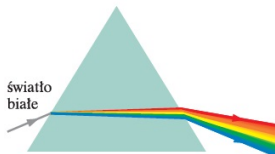


jeżeli współczynnik załamania drugiego ośrodka jest mniejszy, promień załamuje się od normalnej

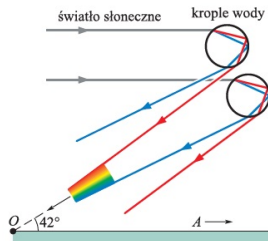


Ośrodek	n	Ośrodek	n
próżnia	1 (dokładnie)	szkło typowe (kron)	1,52
powietrze (0°C, 1 atm)	1,00029	chlorek sodu	1,54
woda (temp. 20°C)	1,33	polistyren	1,55
aceton	1,36	dwusiarczek węgla	1,63
alkohol etylowy	1,36	ciężkie szkło (flint)	1,65
roztwór cukru (30%)	1,38	szafir	1,77
kwarc topiony	1,46	bardzo ciężkie szkło	1,89
roztwór cukru (80%)	1,49	diamant	2,42

Rozszczepienie światła



Jeżeli na drodze promieni słonecznych pojawią się krople padającego deszczu, to część światła ulega załamaniu przy wnikaniu do kropli, a następnie odbija się od wewnętrznej powierzchni kropli i ulega kolejnemu załamaniu przy wyjściu z kropli

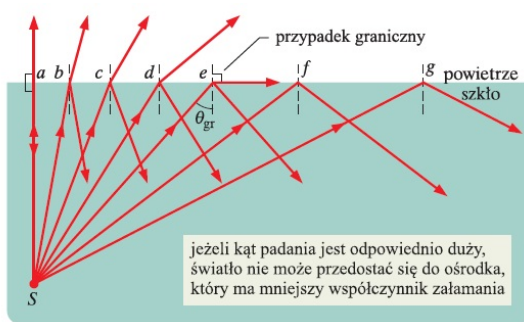


Całkowite wewnętrzne odbicie

$$n_1 \sin \theta_{gr} = n_2 \sin 90^\circ$$

Kąt graniczny:

$$\theta_{gr} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



Zastosowanie: Światło, wprowadzone na jednym końcu światłowodu (wiązki szklanych włókien) jest, w wyniku wielokrotnego całkowitego odbicia od ścianek włókien, przesyłane do jego przeciwnego końca z małymi stratami

Światło odbite pod pewnym kątem θ_B zawiera tylko składowe prostopadłe (jest spolaryzowane)

Światło załamane zawiera pierwotne równoległe do płaszczyzny ekranu składowe, oraz składowe prostopadłe o mniejszym natężeniu (jest częściowo spolaryzowane)

Prawo Brewstera

$$\theta_B + \theta_z = 90^\circ$$

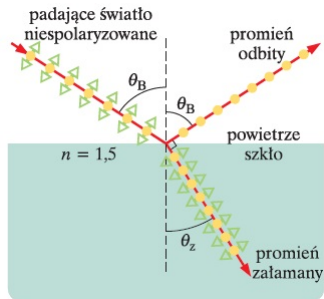
$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_z$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

$$\theta_B = \arctg \frac{n_2}{n_1}$$

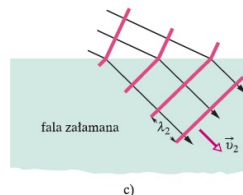
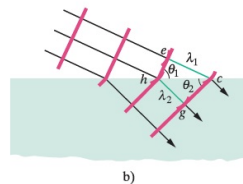
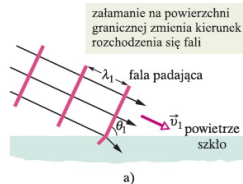
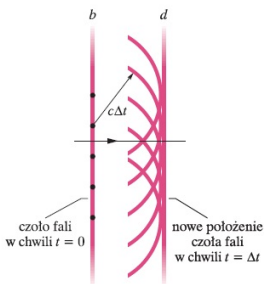
Dla światła padającego pod kątem Brewstera promień odbity i promień załamany są wzajemnie do siebie prostopadłe.

Promień odbity jest całkowicie spolaryzowanym



Zasada Huygensa:

- Wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych.
- Po czasie t nowe położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych



Długość fali jest wprost proporcjonalna do prędkości rozchodzenia się fali w danym ośrodku

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\lambda_n = \lambda \frac{v}{c}$$

Współczynnik załamania światła:

$$n = \frac{c}{v}$$

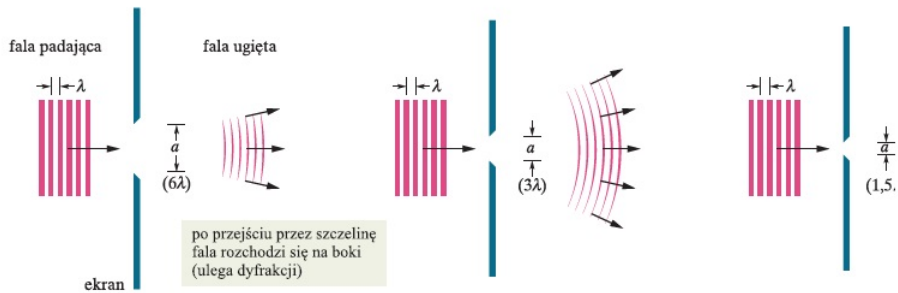
gdzie:

λ_n – długość fali w ośrodku o współczynniku n

v – prędkość światła w tym ośrodku

λ – długość fali w próżni

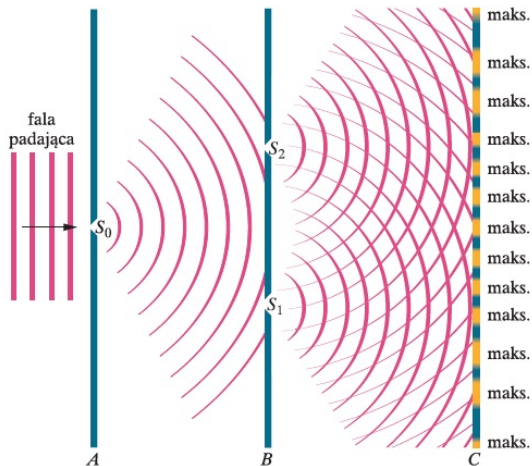
c – prędkość światła w próżni



$$a \sim \lambda \quad (a - \text{szerokość szczeliny})$$

Doświadczenie interferencyjne Younga

fale wychodzące z obydwu szczelin nakładają się na siebie i tworzą obraz interferencyjny



Różnica dróg

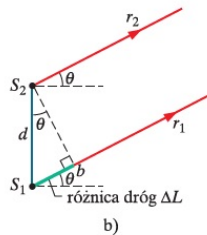
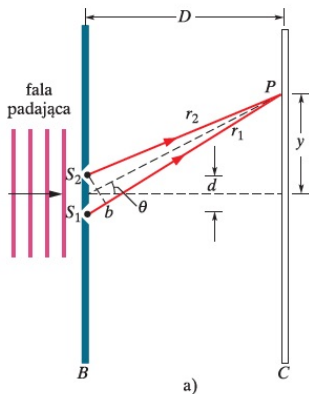
$$\Delta L = d \sin \theta$$

Maksima:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Minima:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$



różnica dróg ΔL
powoduje różnicę faz
i określa wynik interferencji

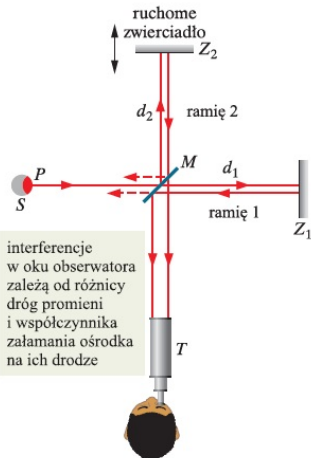
Interferometr Michelsona

Różnica dróg obu fal nakładających się w teleskopie wynosi $2d_2 - 2d_1$

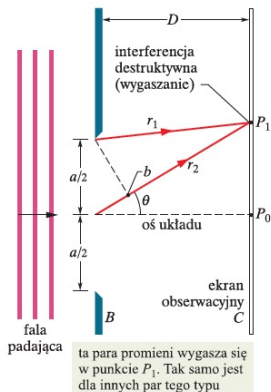
Obserwator widzi obraz interferencyjny: prożki interferencyjne

Przesunięcie zwierciadła Z_2 o odległość $\lambda/2$ powoduje zmianę różnicy dróg λ i przesunięcie prożków

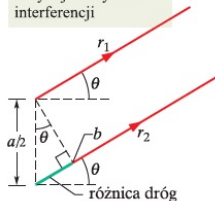
Można zmierzyć długość przedmiotów w jednostkach długości fali światła (wzorzec długości)



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

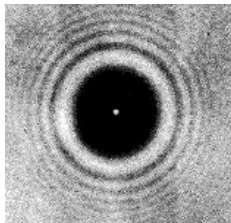
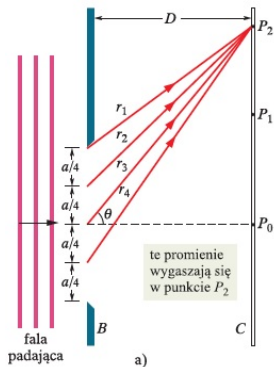


różnica dróg powoduje różnice faz, która decyduje o wyniku interferencji



$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}, \quad a \sin \theta = \lambda \quad (\text{pierwsze minimum})$$

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



W doświadczeniu nad dyfrakcją na pojedynczej szczelinie ciemne prążki powstają tam, gdzie różnica dróg $a \sin \theta$ między skrajnymi promieniami wychodzącymi ze szczeliny są równe $\lambda, 2\lambda, 3\lambda,$

...

Natężenie światła w obrazie interferencyjnym

Fale świetlne z dwóch szczelin

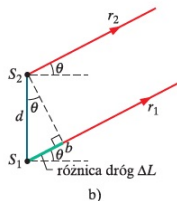
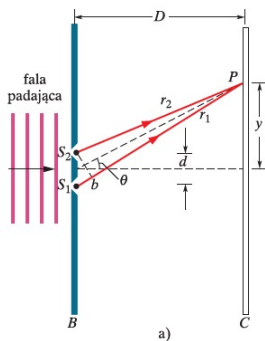
$$E_1 = E_0 \sin \omega t, \quad E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi)$$

Amplituda fali $E_1 + E_2$:

$$E = 2E_0 \cos(\phi/2)$$

Natężenie światła w punkcie P:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{E^2}{E_0^2}, \quad I = 4I_0 \cos^2(\phi/2), \quad \phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$$



różnica dróg ΔL
powoduje różnicę faz
i określa wynik interferencji

$$\Delta L = d \sin \theta$$

$$\Delta L / \lambda = \phi / 2\pi$$

$$\phi = 2\pi \Delta L / \lambda = 2\pi d \sin \theta / \lambda$$

Maksima natężenia

$$\phi / 2 = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

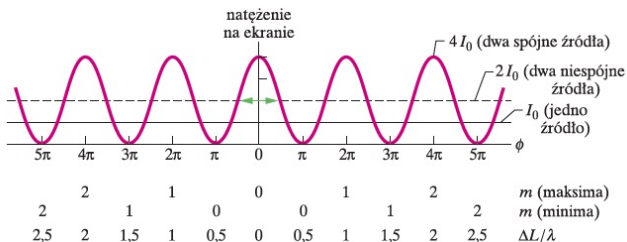
$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Minima natężenia

$$\phi / 2 = (m + 1/2) \pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$d \sin \theta = (m + 1/2) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Natężenie na ekranie



W rzeczywistości trzeba wziąć do uwagi szerokość otworu a , kiedy warunek $a \ll \lambda$ nie jest spełniony