

Podstawy fizyki – sezon 2

8. Fale elektromagnetyczne

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 111

amucha@agh.edu.pl

<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

Przenoszenie informacji

- ▶ Wyobraźmy sobie dwa ładunki: Q i q . Przyciąganie pomiędzy nimi zależy od **odległości**. Jeżeli zacznę poruszać ładunkiem q – skąd Q wie, że coś się zmieniło?

W jaki sposób informacja o ruchu ładunku q dotarła do jego partnera Q ?

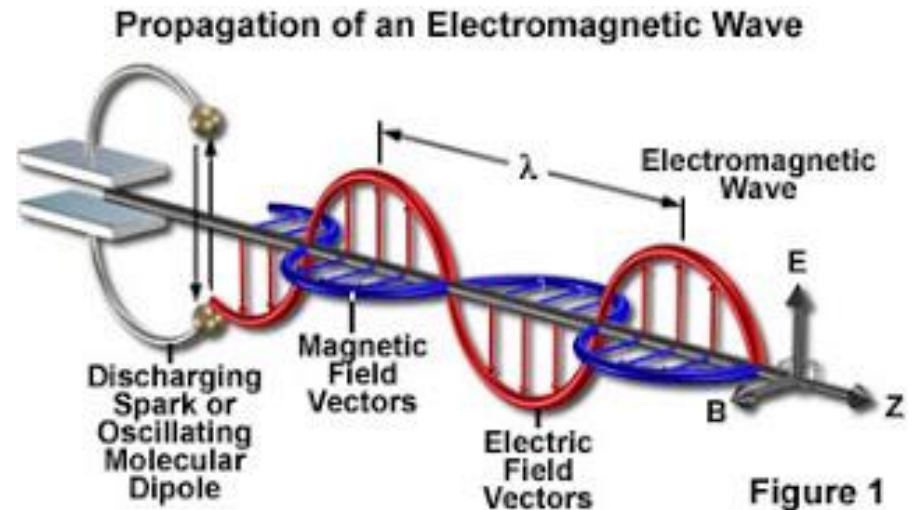
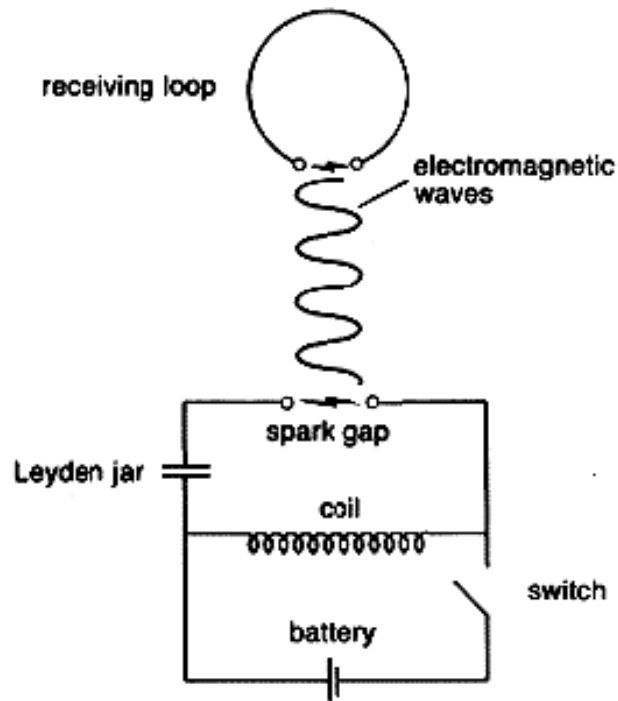
- ▶ Poruszając q wytworzyliśmy zaburzenie. Zaburzenie to rozchodzi się w przestrzeni jako:

FALA ELEKTROMAGNETYCZNA

- ▶ Przewidziana przez J.C.Maxwella w 1834 roku:
 - zmieniające się pole elektryczne jest źródłem pola magnetycznego,
 - przyspieszane ładunki elektryczne promieniują falę elektromagnetyczną,
 - fala elektromagnetyczna rozchodzi się z prędkością $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.
 - pola magnetyczne i elektryczne oscylują w czasie.

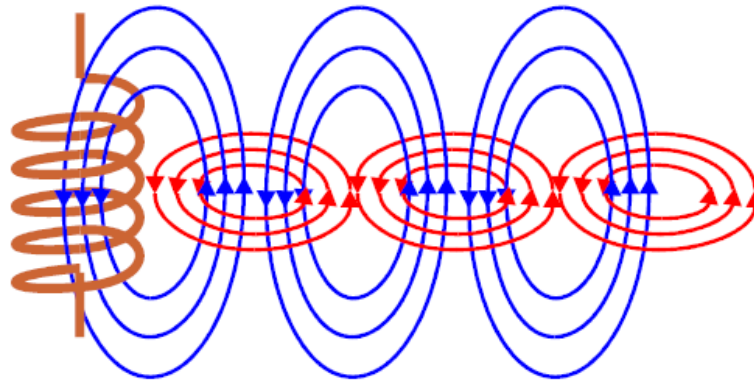
Wytworzenie fali elektromagnetycznej

- ▶ Fale elektromagnetyczne zostały odkryte w 1887 przez Heinricha Hertza
- ▶ Doświadczenie Hertza pokazuje transmisję i odbiór fali elektromagnetycznej.
- ▶ Hertz również pokazał, że powierzchnie przewodników odbijają fale.



Propagacja fali elektromagnetycznej

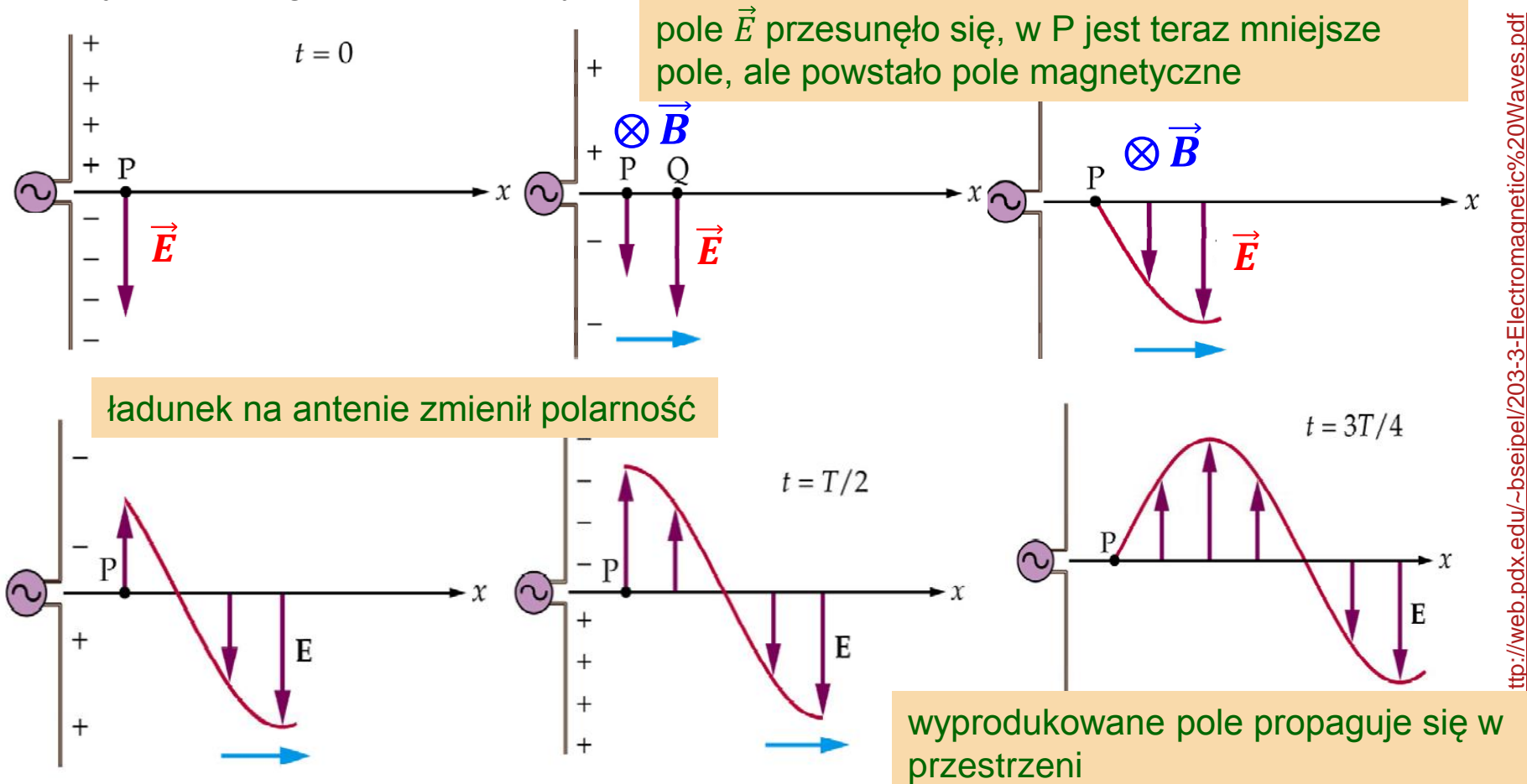
- ▶ Zmieniające się pole magnetyczne jest źródłem pola elektrycznego.
- ▶ Zmiany pola elektrycznego powodują powstanie wirowego pola magnetycznego – zmiany pola rozchodzą się w przestrzeni!



- ▶ Równania Maxwella pokazują, że:
 - Ładunek punktowy w spoczynku wytwarza statyczne pole \vec{E} , ale nie wytwarza pola \vec{B} ,
 - Ładunek punktowy poruszający się ze stałą prędkością wytwarza zarówno pole \vec{E} , jak i pole \vec{B} .
 - Ładunek poruszający się z przyspieszeniem wytwarza **fale elektromagnetyczne.**

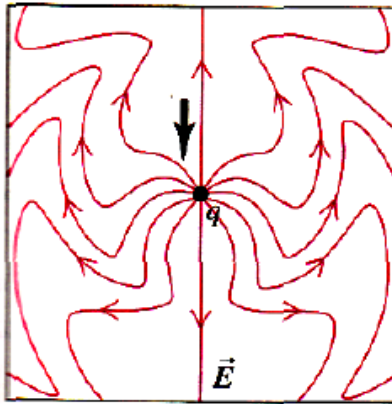
Falowanie pól

- ▶ Obserwujemy, jak zmienia się wektor natężenia pola elektrycznego \vec{E} wytworzonego przez antenę zasilanym zmiennym napięciem.

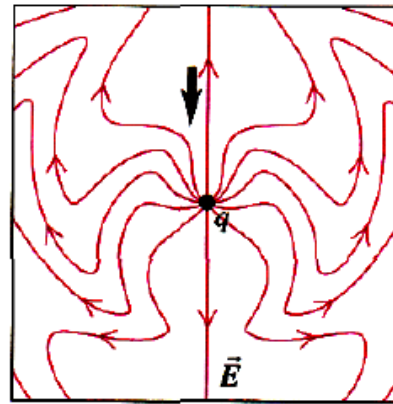


Linie pola

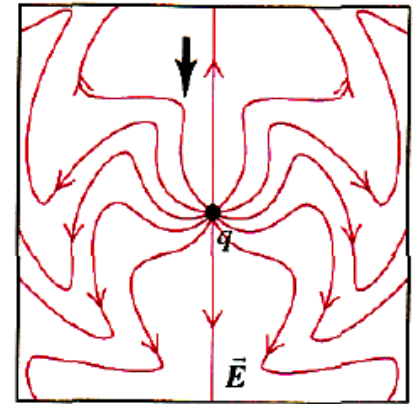
Przyspieszany ładunek wytworzył pole elektrycznie o zmieniających się w czasie liniach:



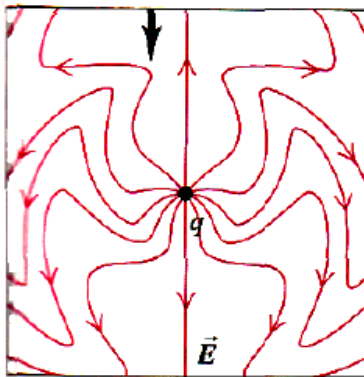
(a) $t = 0$



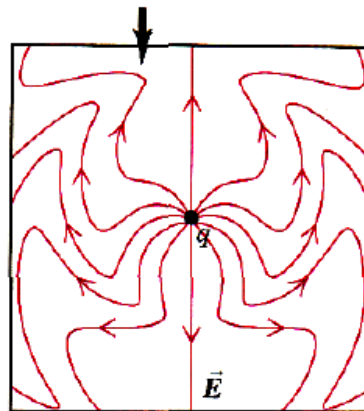
(b) $t = T/4$



(c) $t = T/2$



(d) $t = 3T/4$

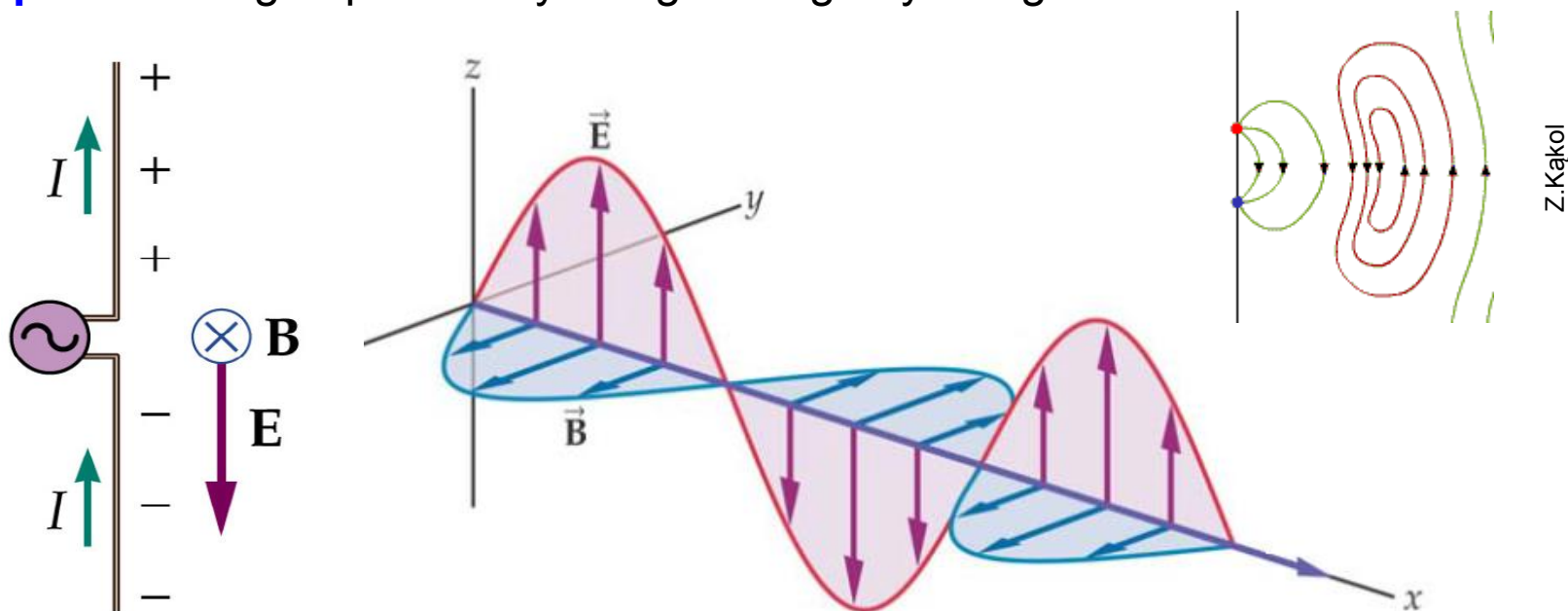


(e) $t = T$

- linie pola rozprzestrzeniają się z upływem czasu.
- fale są najsilniejsze w kierunku prostopadłym do drgającego ładunku

a teraz pole magnetyczne...

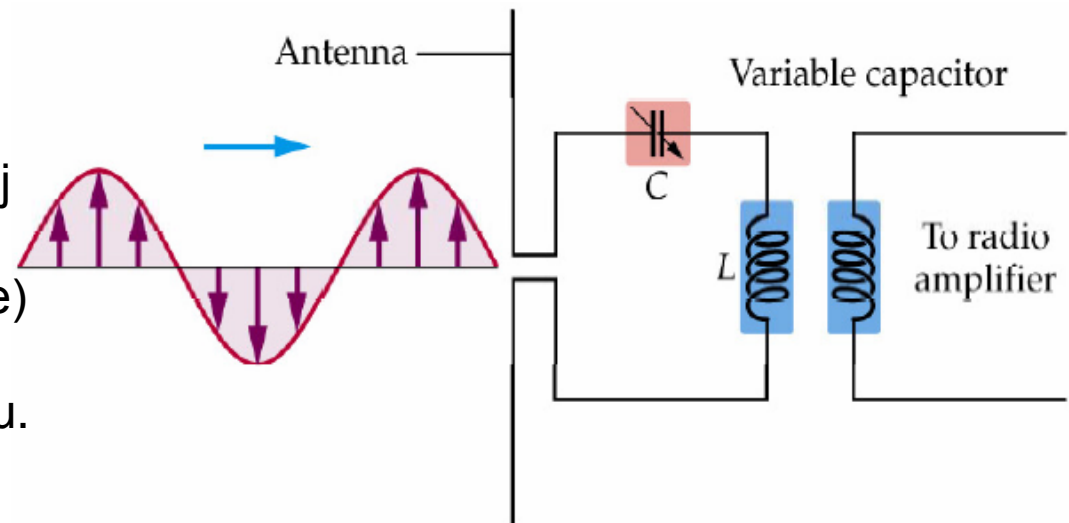
- ▶ Pole elektryczne – o natężeniu skierowanym w dół, stało się źródłem pola magnetycznego skierowanego prostopadle, „za tablicę”.
- ▶ Pole elektryczne i magnetyczne są **ZAWSZE** prostopadłe do siebie.
- ▶ Fala elektromagnetyczna jest falą **płaską**, poprzeczną, rozchodzącą się **prostopadle** do drgań pól elektrycznego i magnetycznego



Komunikacja radiowa

► G. Marconi – „wynalazca” radia, w 1901 roku przeprowadził transmisję przez Atlantyk.

- urządzenie nadawcze – antena (drut) ładunki drgają, co prowadzi do powstania silnych drgań harmonicznyc. Drga wiele ładunków – sygnał jest silniejszy i może być przekazywany na duże odległości,
- odbiornik - antena – pole wywiera siłę na ładunki i pobudza je do drgań, powodując przepływ prądu (wzmacnianego we wzmacniaczu – transformatorze)
- odbiornik dostraja się do częstotliwości rezonansowej nadajnika, co powoduje przepływ dużego (względnie) prądu. Dalsze wzmacnienie następuje we wzmaczniaczu.

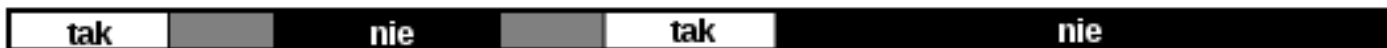


Zastosowania fal elm

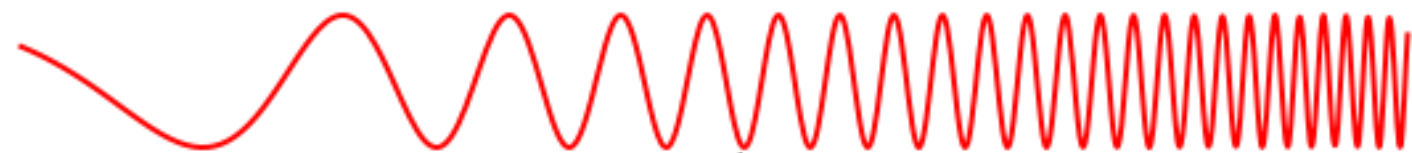
- ▶ **Fale elektromagnetyczna** jest to rozchodzące się w przestrzeni (próżni lub w dowolnym ośrodku) **zaburzenie pól: elektrycznego i magnetycznego**
- ▶ Nie ma żadnych ograniczeń na częstotliwość fal elektromagnetycznych (poza możliwościami technicznymi)..
- ▶ Do fal elektromagnetycznych zaliczamy (nieomal) całe promieniowanie we Wrzechświecie.
- ▶ Fale elektromagnetyczne możemy podzielić ze względu na:
 - **pochodzenie** (układy elektryczne, Słońce, wzbudzenia atomów, wzbudzenia jąder, rozszepienie izotopów),
 - **zastosowanie** (wi-fi, bluetooth, komunikacja, TV, kuchnia, opalanie się, grzanie, świecenie, prześwietlenia, leczenie nowotworów) .
- ▶ Chciaż do do każdego zastosowanie używane jest różne źródło, które wytwarza falę o różnej długości (energii), to w każdym przypadku jest to ta sama fizyka – zmiany pól \vec{E} i \vec{B} !!!

Widmo fali elm

Przenika atmosferę ziemską?



Typ promieniowania
Długość fali (m)



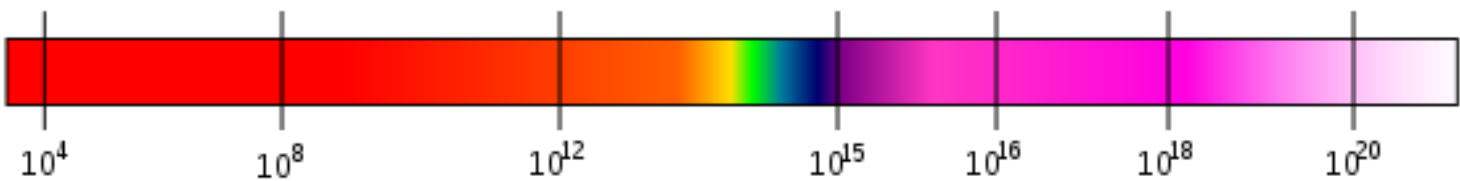
radiowe 10^3 **mikrofałe** 10^{-2} **podczerwień** 10^{-5} **światło widzialne** 0.5×10^{-6} **ultrafiolet** 10^{-8} **rentgenowskie** 10^{-10} **gamma** 10^{-12}

Ciało o skali zbliżonej do długości fali

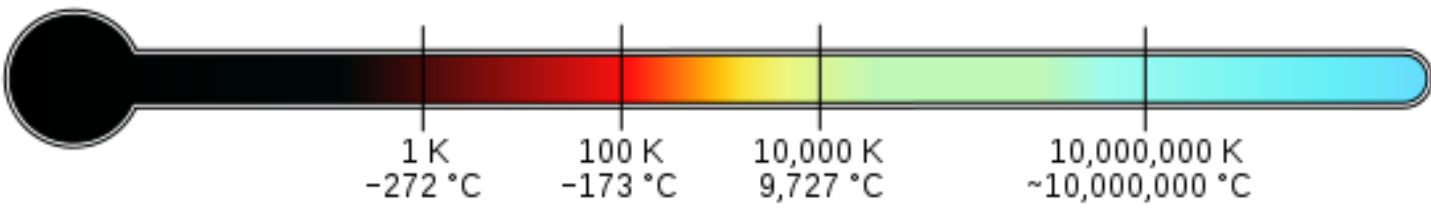


budynki człowiek motyl ostrze igły pierwotniaki molekuly atomy jądra atomowe

Częstotliwość (Hz)



Temperatura ciała, którego maksimum promieniowania jest w danej długości fali



już dziesiąty slajd, a jeszcze nie było żadnego wzoru?

Równania falowe

► Powtórka z wykładu 8 (Ruch falowy), slajd 6 :

- równanie falowe dla fal mechanicznych rozchodzących się wzdłuż dodatniej osi x z prędkością v :

$$\frac{d^2u}{dx^2} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2u}{dt^2} = 0$$

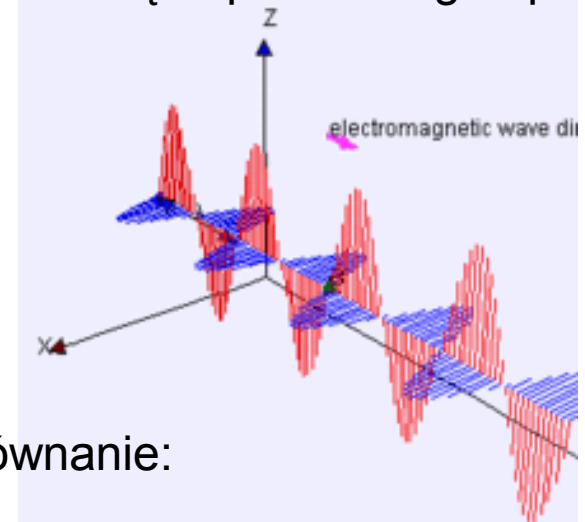
- rozwiązaniem tego równania jest funkcja: $u(x, t) = A \sin(kx + \omega t)$, $\frac{\omega}{k} = v$

► Rozumiemy już, że fala elektromagnetyczna rozchodzi się w postaci drgań pól, prostopadle do ich kierunku drgań.

- Można ją zatem opisać równaniami:

$$E(x, t) = E_{max} \cos(kx - \omega t)$$

$$B(x, t) = B_{max} \cos(kx - \omega t)$$



A skoro znamy już rozwiązanie, to możemy napisać i równanie:

Równanie fali elektromagnetycznej

- ▶ Równanie falowe dla rozchodzących się wzdłuż dodatniej osi x sinusoidalnych drgań pól \vec{E} i \vec{B} :

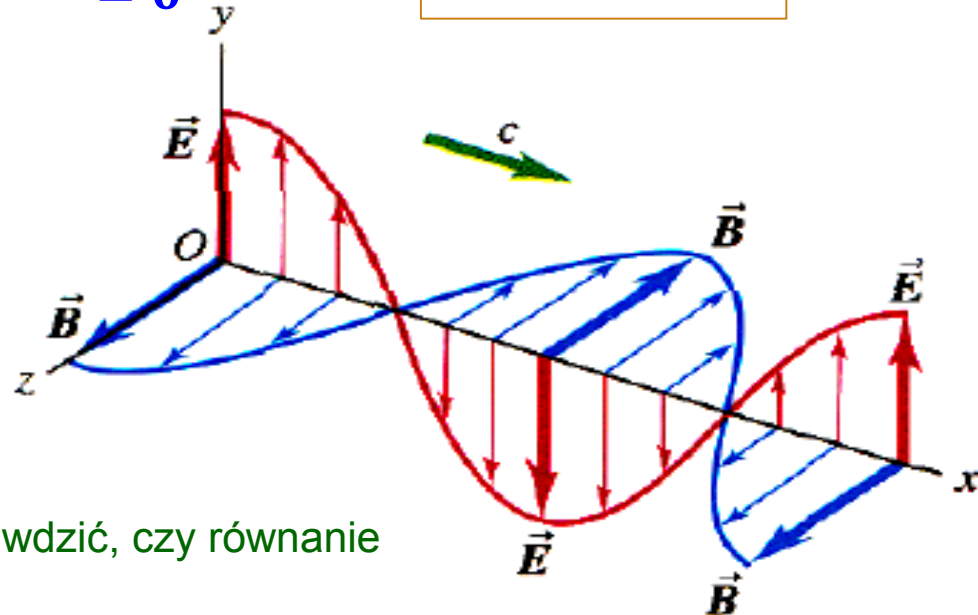
$$\frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 B_z(x, t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B_z(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$

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

- ▶ Fala jest tu **spolaryzowana**, tzn. wektory \vec{E} i \vec{B} drgają zawsze wzdłuż jednej osi (y i z odpowiednio)



jak zwykle zgadując rozwiązanie, należy sprawdzić, czy równanie jest spełnione!

Energia fali elm

- ▶ Fala elektromagnetyczna przenosi energię.
- ▶ Szybkość przepływu energii przez jednostkową powierzchnię płaskiej fali elektromagnetycznej opisujemy wektorem **Poyntinga** \vec{S} :

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

- ▶ Kierunek wektora Poyntinga jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali (prostopadły do \vec{E} i \vec{B}), a jego wartość jest równa szybkości przenoszenia energii przez falę w jednostkowym czasie na jednostkę powierzchni:

$$S = \frac{1}{\mu_0} E B = \frac{E}{t S} = \frac{P}{S} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

skoro: $E = c B$:

$$S(t) = \frac{1}{c\mu_0} E^2 = \frac{1}{c\mu_0} E^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

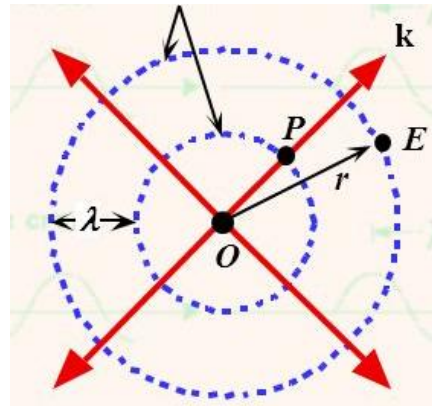
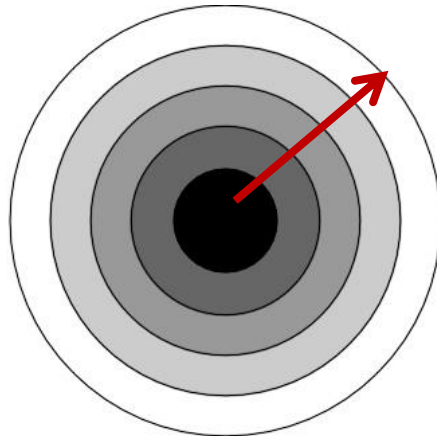
Natężenie promieniowania

Jeżeli uśrednimy $S(t)$ dostaniemy definicję **natężenia** fali elm:

$$I = \frac{1}{c\mu_0} \frac{E^2}{2}$$

Natężenie promieniowania $I \propto$ kwadratu amplitudy E^2

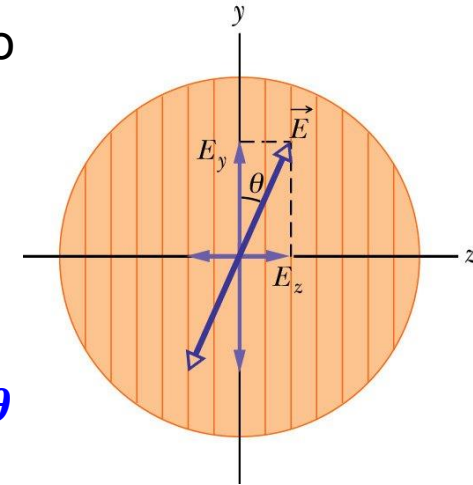
- ▶ Jeśli mamy punktowe źródło fali – emituje ono energię jednorodnie we wszystkich kierunkach, a powierzchnie falowe tworzą sferę:



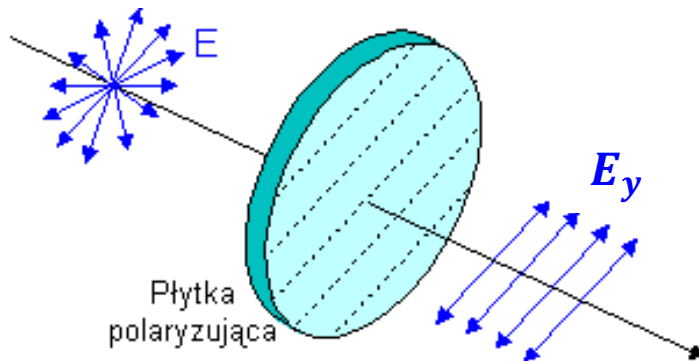
natężenie promieniowania maleje z odległością: $I(r) = \frac{P_0}{4\pi r^2}$

Polaryzacja

- ▶ Wektor natężenia może drgać w dowolnym kierunku – światło niespolaryzowane (Słońce, żarówka).
- ▶ Jeżeli wektor \vec{E} wyznacza płaszczyznę drgań, a kąt θ jest pomiędzy płaszczyzną drgań a kier. polaryzacji płytki, to przepuszczona jest tylko składowa E_y , a E_x jest pochłaniana.

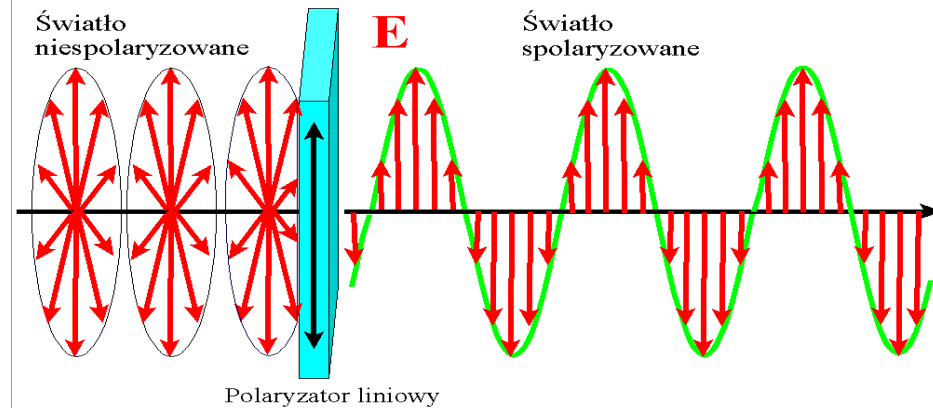


$$E_y = E \cos \theta$$



- ▶ Zastosowanie polaroidów – tłumienie (absorbpcja) składowych natężenia w niektórych kierunkach.

Polaryzacja liniowa fali elektromagnetycznej



http://www.if.pw.edu.pl/~bibliot/archiwum/adamczyk/WykJLadyFO/FoWwww_43.html

Polaryzacja światła (fali)

- ▶ Po przejściu przez polaryzator 50% energii jest pochłaniane (a 50% przepuszczone).
- ▶ Natężenie światła przepuszczonego (prawo Malusa): $I = I_0 \cos^2 \theta$
- ▶ Światło spolaryzowane można otrzymać w wyniku odbicia:

Istnieje pewien kąt padania (kąt całkowitej polaryzacji α_p , dla którego wiązka odbita jest całkowicie spolaryzowana liniowo w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania.

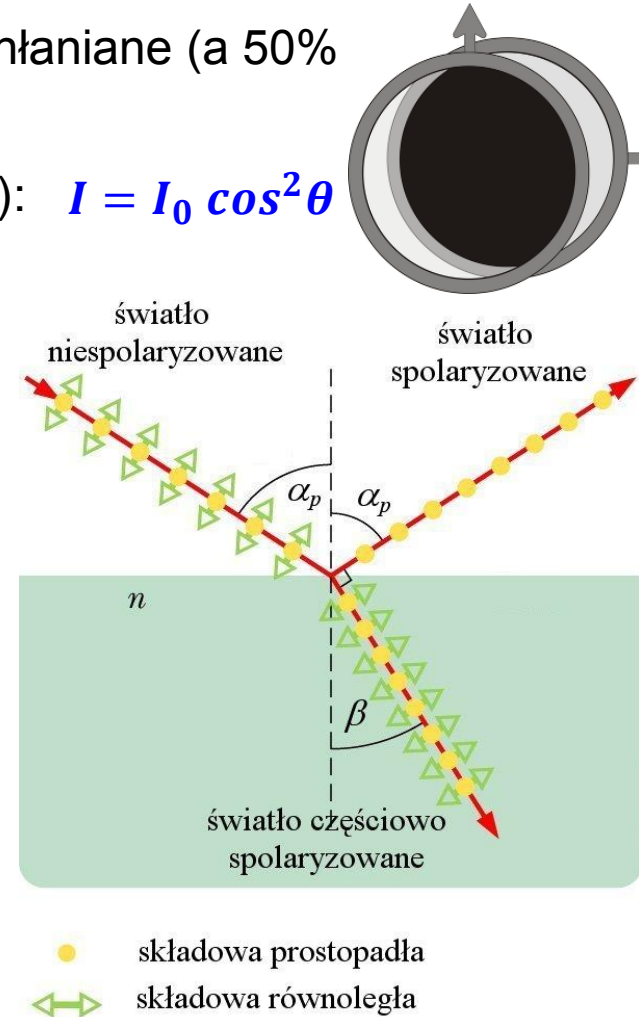
Gdy kąt padania jest równy kątowi całkowitej polaryzacji to wówczas wiązka odbita i załamana tworzą kąt prosty

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

$$\boxed{\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}}$$

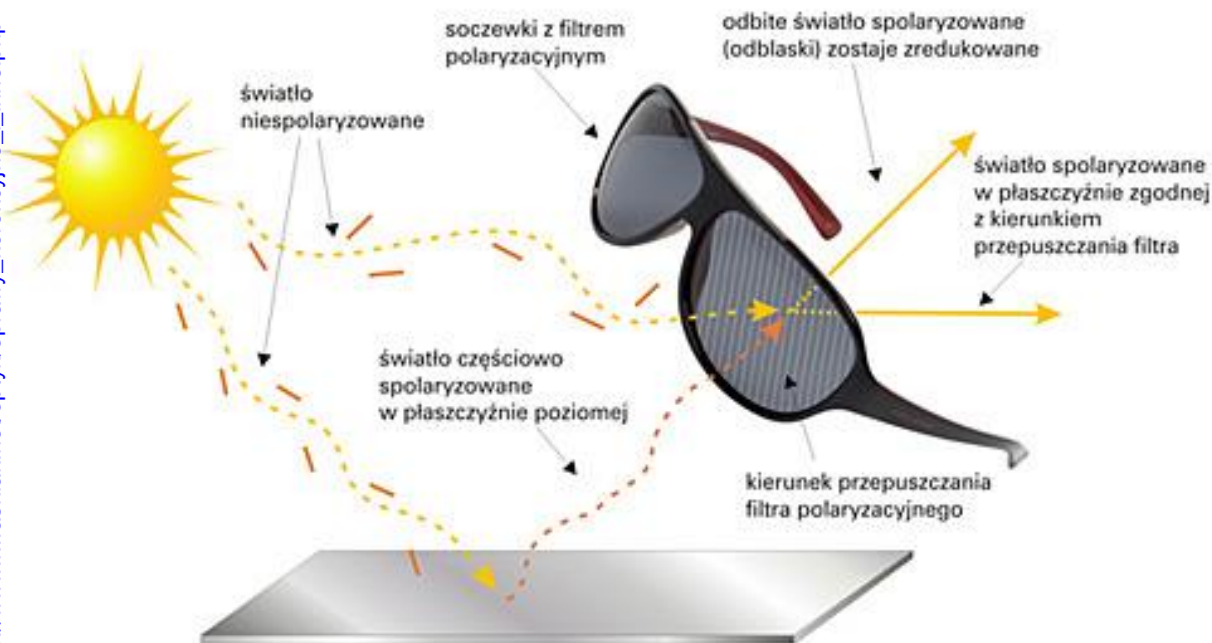
kąt Brewstera

dla $n = 1.5$ otrzymujemy $\alpha_p = 56^\circ$



Praktyka polaryzacji światła

http://www.kwasniak.net/optyk/oprawy_korekcyjne_i_inne.php



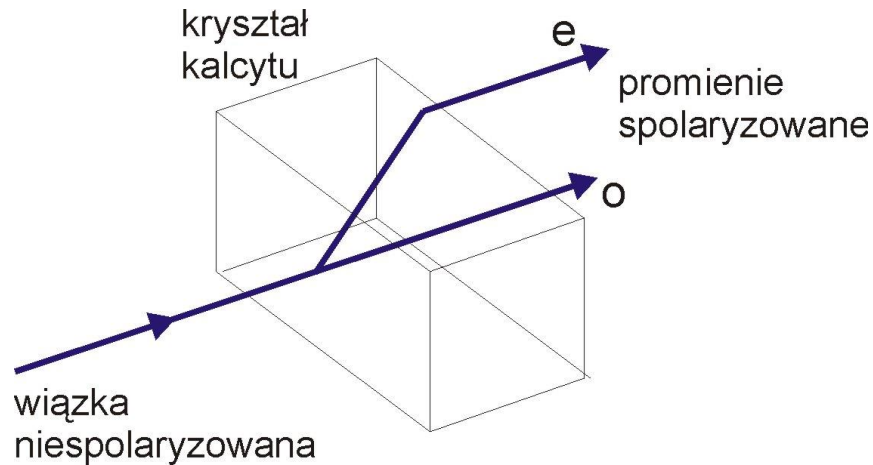
Z POLARYZACJĄ



BEZ POLARYZACJI

Dwójłomność

- ▶ Światło spolaryzowane można uzyskać wykorzystując, występującą w pewnych kryształach, zależność współczynnika załamania światła od kierunku polaryzacji.

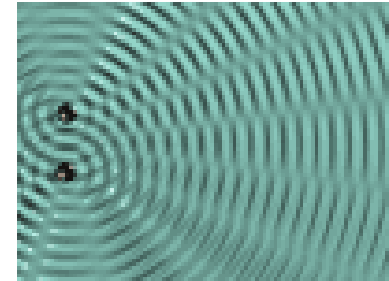


Promień zwyczajny (o) i promień nadzwyczajny (e) są spolaryzowane liniowo, przy czym ich płaszczyzny drgań są wzajemnie prostopadłe.

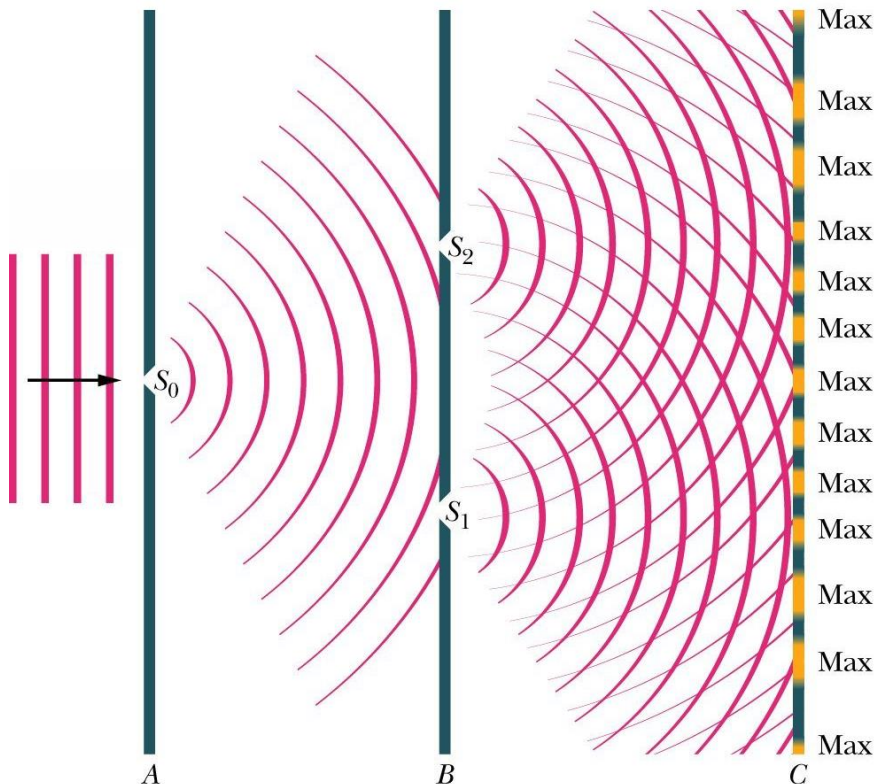
Niektóre podwójnie załamujące kryształy wykazują ponadto własność nazywaną **dichroizmem**. Kryształy te pochłaniają jeden z promieni (o lub e) silniej niż drugi. Na wykorzystaniu tego zjawiska opiera się działanie szeroko stosowanych polaroidów.

Interferencja fal

- ▶ Nakładanie się (interferencja) fal



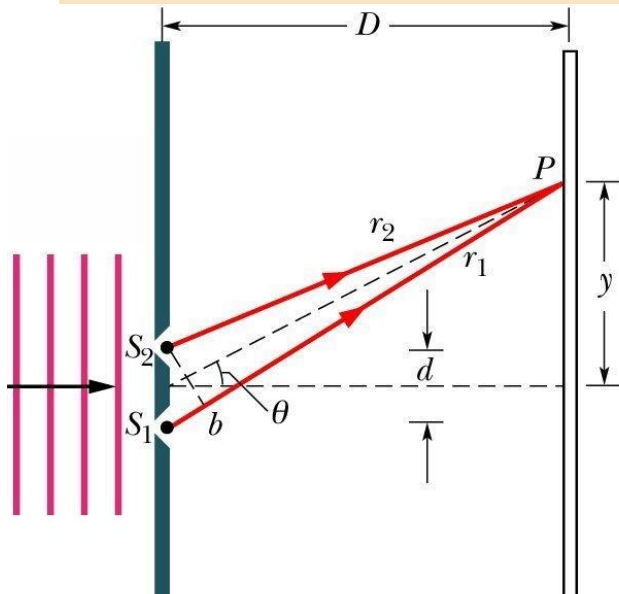
Doświadczenie Younga



Young (1801 r.) → interferencja dla światła → pierwszy eksperyment wskazujący na falowy charakter światła.

Na ekranie obserwujemy miejsca ciemne powstające w wyniku wygaszania się interferujących fal i jasne powstające w wyniku ich wzajemnego wzmacnienia. Obserwujemy tak zwane prążki interferencyjne.

Interferencja fal



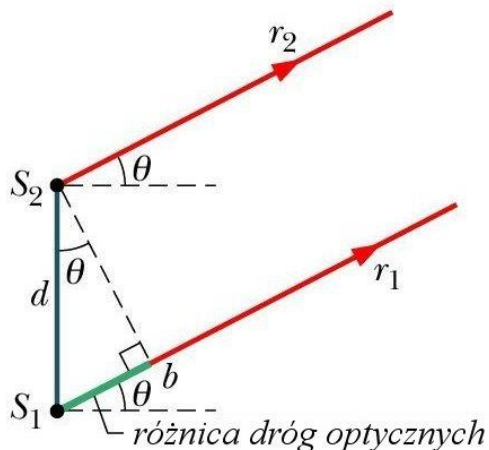
Warunek na maksimum:

$$S_1 b = m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad S_1 b = d \sin \theta$$

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad m = 1, 2, \dots (\text{maksima})$$

Minimum natężenia światła

$$S_1 b = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

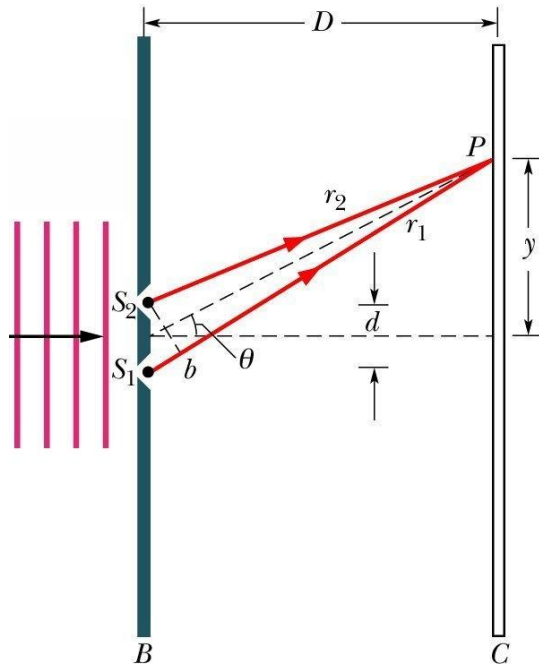


$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, \dots (\text{minima})$$

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m}$$

Tak Young wyznaczył długości fal światła widzialnego.

Interferencja – fala wypadkowa



$$E_1 = E_0 \sin(k r_1 - \omega t)$$

$$E_2 = E_0 \sin(k r_2 - \omega t)$$

$$d \sin \theta = \Delta r = r_2 - r_1$$

W punkcie P

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

φ to różnica **faz** jaka powstaje na drodze Δr

$$\frac{\text{różnica faz}}{2\pi} = \frac{\text{różnica dróg}}{\lambda}$$

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{d \sin \theta}{\lambda}$$

Warunkiem stabilności obrazu jest **stałość w czasie różnicy faz fal** wychodzących ze źródeł S_1 i S_2 . Mówimy, że te źródła są **koherentne czyli spójne**.

$$E = E_0 \sin \omega t + E_0 \sin(\omega t + \varphi) = 2E_0 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$E = E_1 + E_2$$

$$E = E_\theta \sin(\omega t + \beta)$$

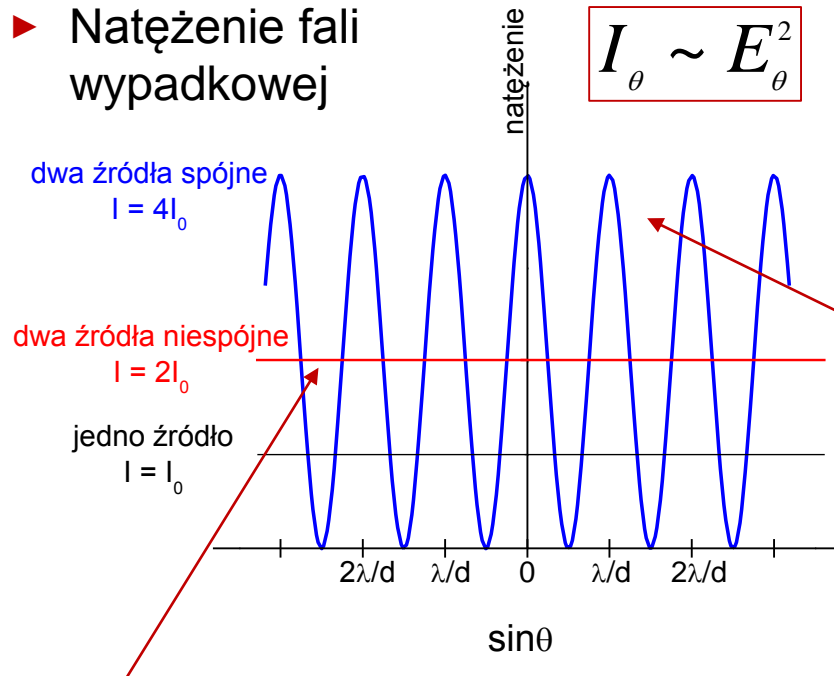
gdzie

$$\beta = \frac{\varphi}{2}$$

$$E_\theta = 2E_0 \cos \beta$$

Interferencja – natężenie fali

- Natężenie fali wypadkowej



$$I_{\theta} \sim E_{\theta}^2$$

$$I_{\theta} = 4I_0 \cos^2 \beta$$

$$\beta = \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

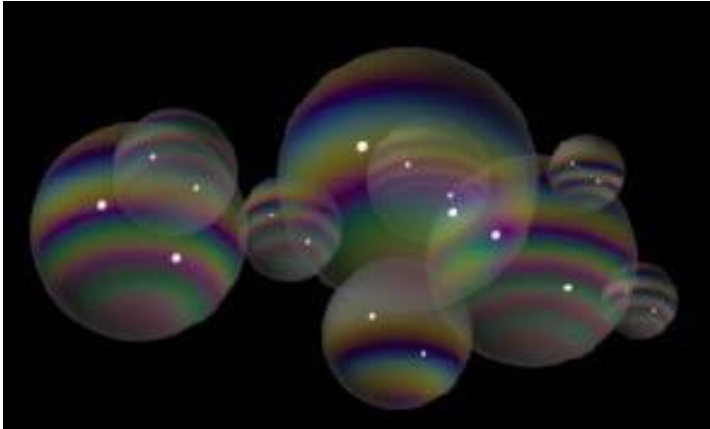
$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \left(\frac{E_{\theta}}{E_0} \right)^2 = (2 \cos \beta)^2$$

Dla fal spójnych (np. laser) najpierw **dobawiamy amplitudy** (uwzględniając stałą różnicę faz), a potem celem obliczenia natężenia podnosimy otrzymaną amplitudę wypadkową do kwadratu.

Dla fal niespójnych (np. żarówki) najpierw podnosimy do kwadratu amplitudy, żeby obliczyć natężenia poszczególnych fal, a dopiero potem **sumujemy natężenia** celem otrzymania natężenia wypadkowego.

Energia całkowita taka sama !!
(różny jej rozkład)

Interferencja na cienkich warstwach

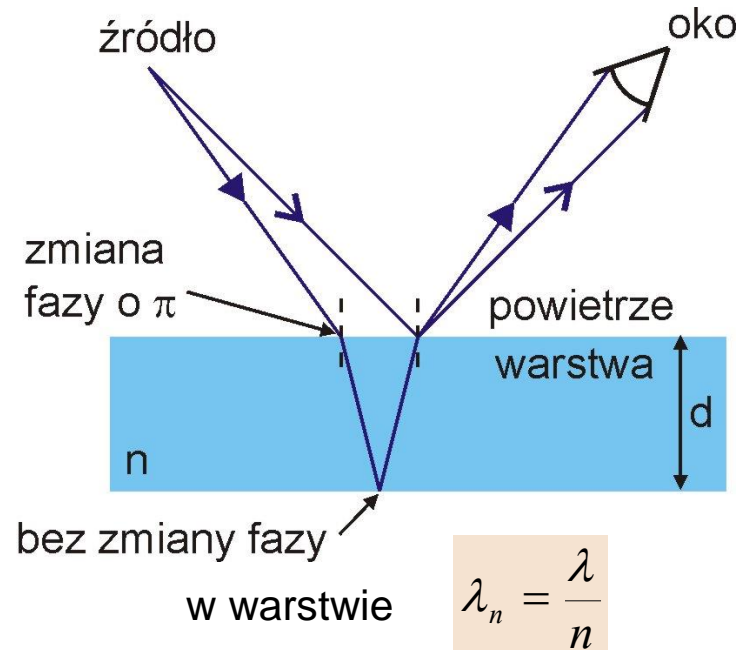


Warunki interferencyjne
(normalne padanie)

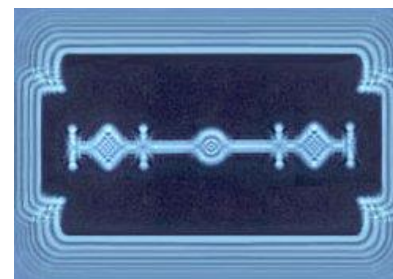
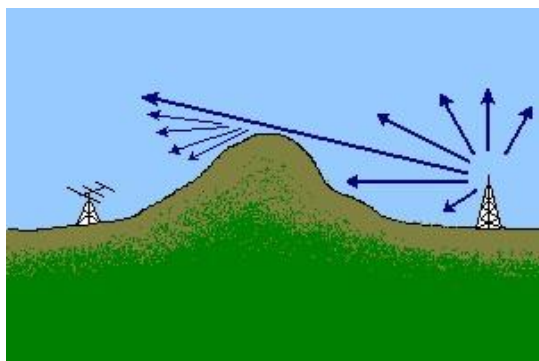
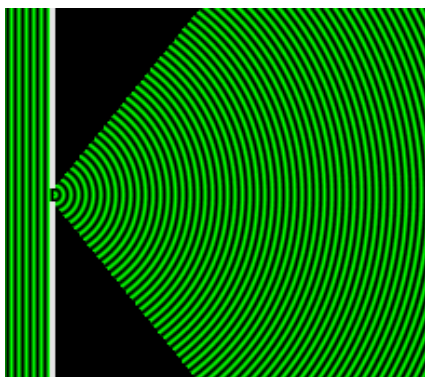
$$2d = m\lambda_n + \frac{\lambda_n}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots (\text{maksima})$$

$$2dn = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots (\text{minima})$$

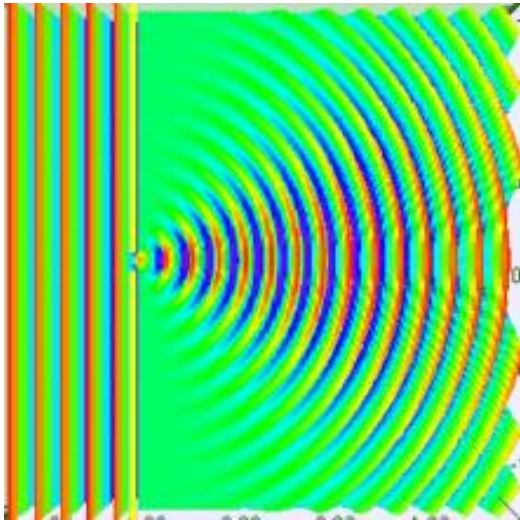
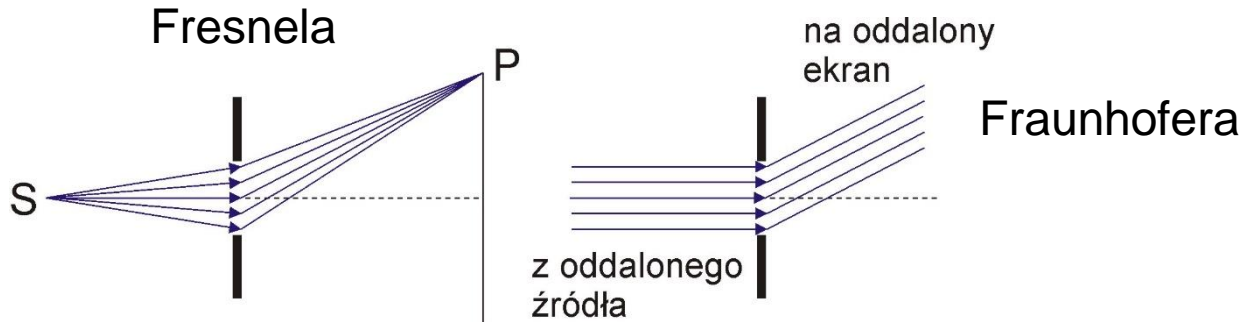


Dyfrakcja (ugięcie) fali

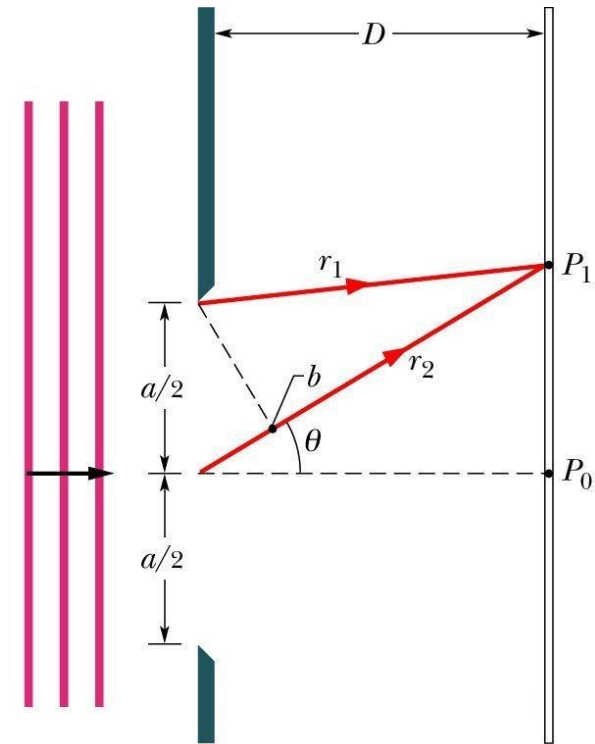


Dyfrakcja fali

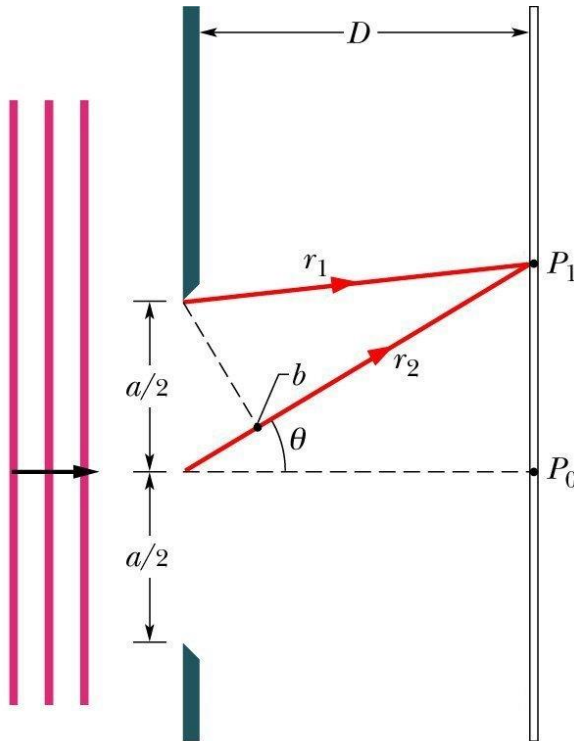
► Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



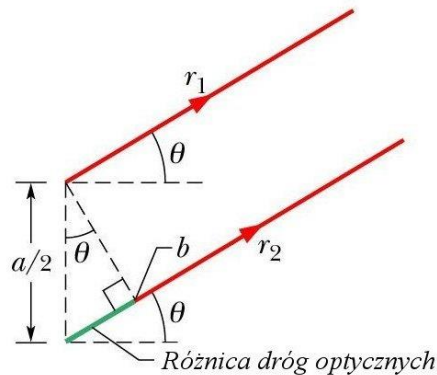
Natężenie w punkcie P obliczamy dodając do siebie zaburzenia falowe (wektory \mathbf{E}) docierające z różnych punktów szczeliny.



Dyfrakcja fali



Natężenie w punkcie P obliczamy dodając do siebie zaburzenia falowe (wektory \mathbf{E}) docierające z różnych punktów szczeliny.



minimum dyfrakcyjne

$$\frac{1}{2}a \sin \theta = \frac{1}{2}\lambda$$

$$a \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, \dots (\text{minima})$$

Natężenie fali w obrazie dyfrakcyjnym

$$I_{\theta} \sim E_{\theta}^2$$

$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

$$\alpha = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{minimum}$$

$$\alpha = \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{maksimum}$$

$$m = 1$$

$$m = 2$$

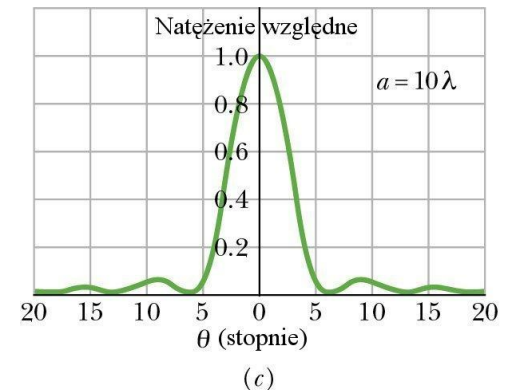
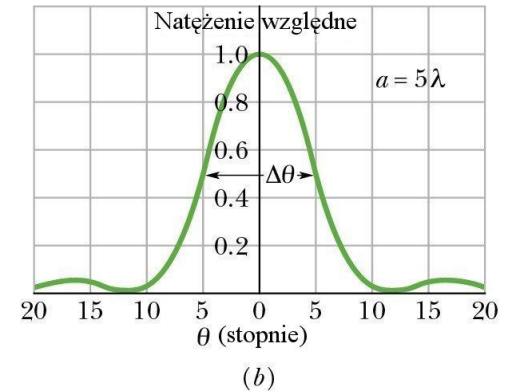
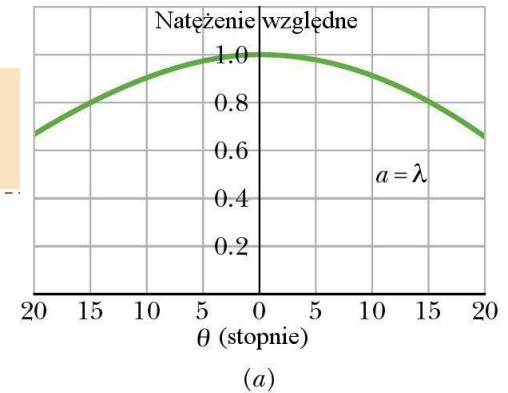
$$m = 3$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = 0.045$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = 0.016$$

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = 0.008$$

Efekty optyki falowej są widoczne, gdy długość fali jest porównywalna z rozmiarami przedmiotu



Interferencja i dyfrakcja

- ▶ Dwie szczeliny: pojedyncza szczelina daje obraz dyfrakcyjny i te obrazy interferują

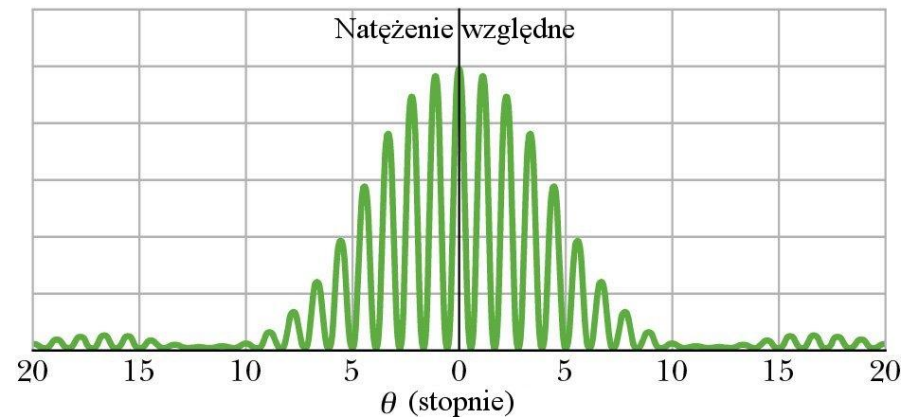
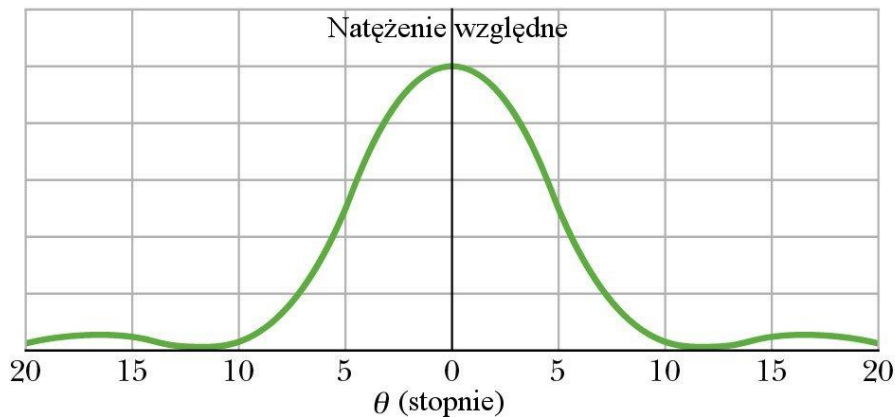
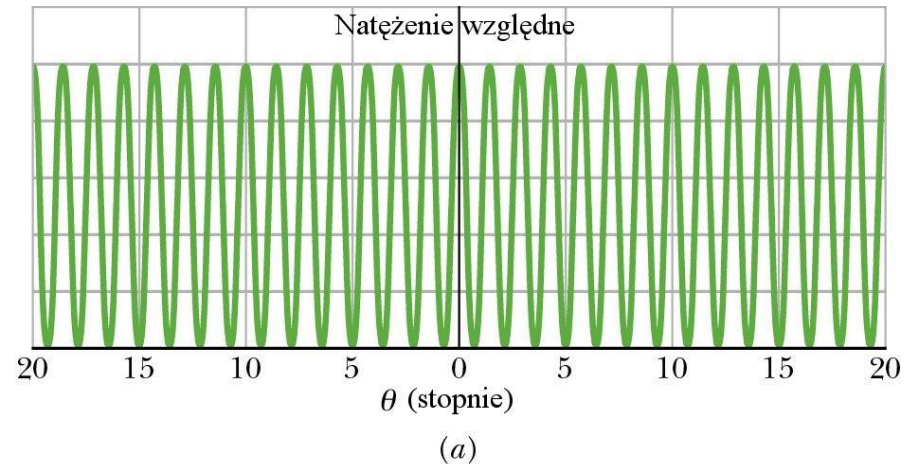
$$I_{Dyfr,\theta} = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

$$I_{Int,\theta} = 4I_0 \cos^2 \beta$$

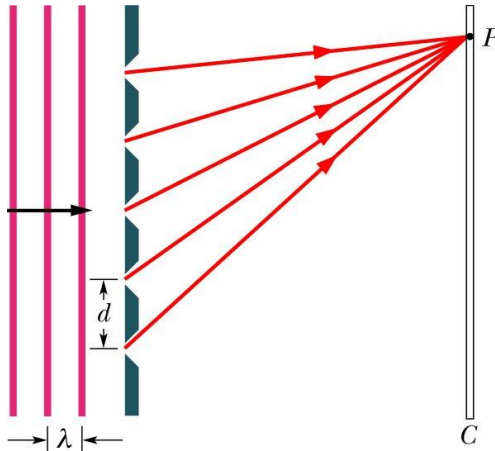
$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

$$I_\theta = I_m (\cos \beta)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$



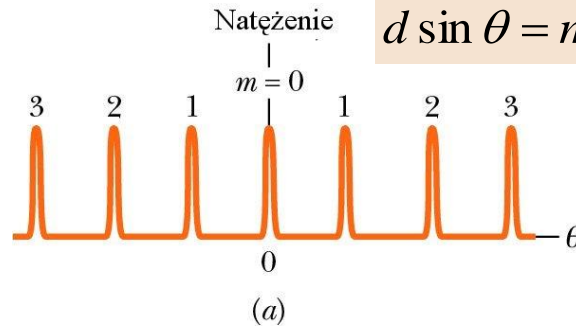
Siatka dyfrakcyjna

- Siatka dyfrakcyjna – interferencja z wielu źródeł



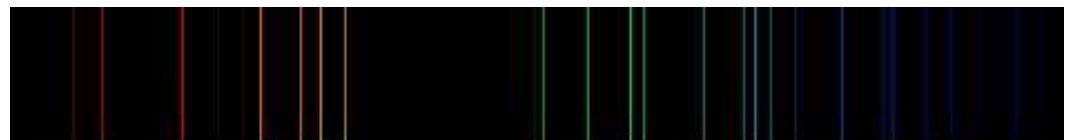
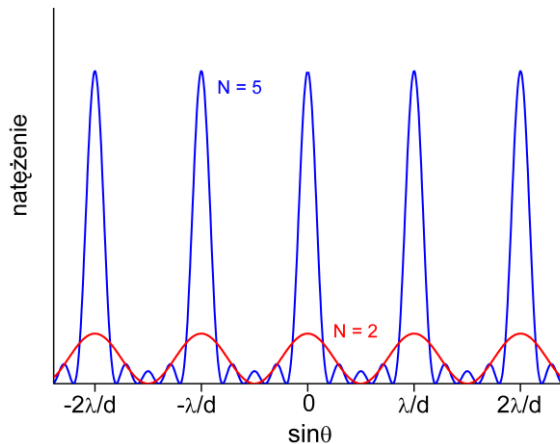
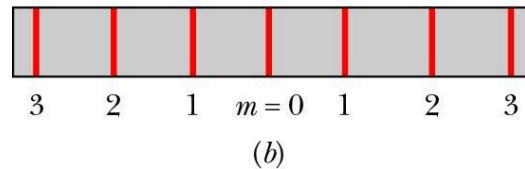
Nie zmienia się odległości pomiędzy głównymi maksimami. Obserwujemy **wzrost natężenia maksimów głównych**.

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, \dots (\text{maksima})$$



d - stała siatki dyfrakcyjnej

w spektrometrii, do pomiaru długości fal stosuje się siatki o stałej $d = 1 \text{ mm}$



Podsumowanie

- ▶ Poruszające się ładunki są źródłem pól: elektrycznego i magnetycznego.
- ▶ Pola te propagują się w przestrzeni w postaci **fali elektromagnetycznej**.
- ▶ Fala elektromagnetyczna jest falą **płaską**, poprzeczną, rozchodzącą się **prostopadle** do drgań pól elektrycznego i magnetycznego
- ▶ Falę elektromagnetyczną można **spolaryzować**.
- ▶ Fala ulega zjawisku **dyfrakcji i interferencji**.
- ▶ Fala elm obejmuje zakres od 10^{-16} do 10^6 m, ale tylko niewielki fragment tego widma jest widzialny dla oka ludzkiego – o takiej fali elm mówimy „**światło**”

