

# Podstawy fizyki – sezon 2

## **Fale elektromagnetyczne**

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106

[amucha@agh.edu.pl](mailto:amucha@agh.edu.pl)

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

# Równania Maxwella – postać całkowa

- ❑ Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne - strumień pola elektrycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy całkowitemu ładunkowi objętemu tą powierzchnią (prawo Gaussa).
- ❑ Pole elektryczne jest indukowane zmiennym w czasie strumieniem pola magnetycznego (prawo Faradaya).
- ❑ Nie istnieją monopole magnetyczne - strumień pola magnetycznego przechodzący przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy zero (prawo Gaussa dla pola magnetycznego).
- ❑ Źródłem pola magnetycznego jest prąd elektryczny lub zmienny w czasie strumień pola elektrycznego (uogólnione prawo Ampera)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I$$

# 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:

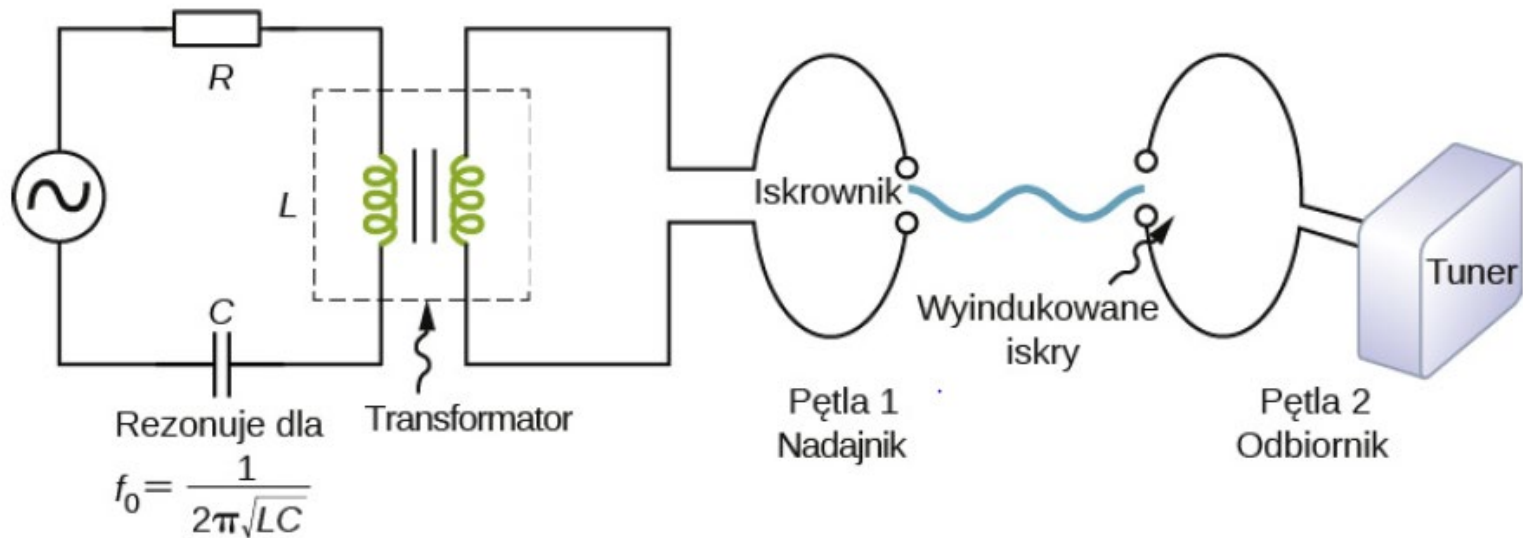
## FALA ELEKTROMAGNETYCZNA



- 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

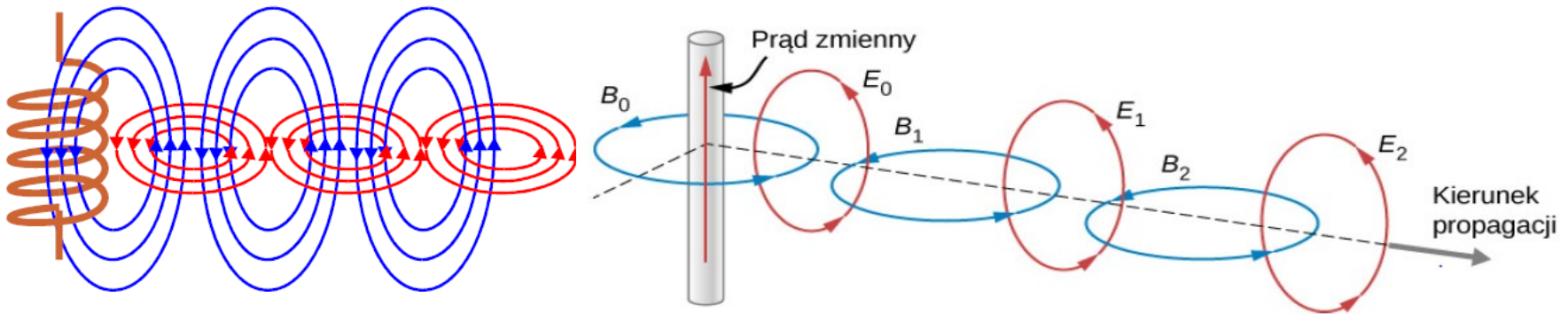
- Fale elektromagnetyczne zostały odkryte w 1887 przez Heinricha Hertza
- Doświadczenie Hertza pokazuje transmisję i odbiór fali elektromagnetycznej.
- Hertz również pokazał, że powierzchnie przewodników odbijają fale.



brak ośrodka!!! fale mogą rozchodzić się w próżni!!

# Propagacja fali elektromagnetycznej

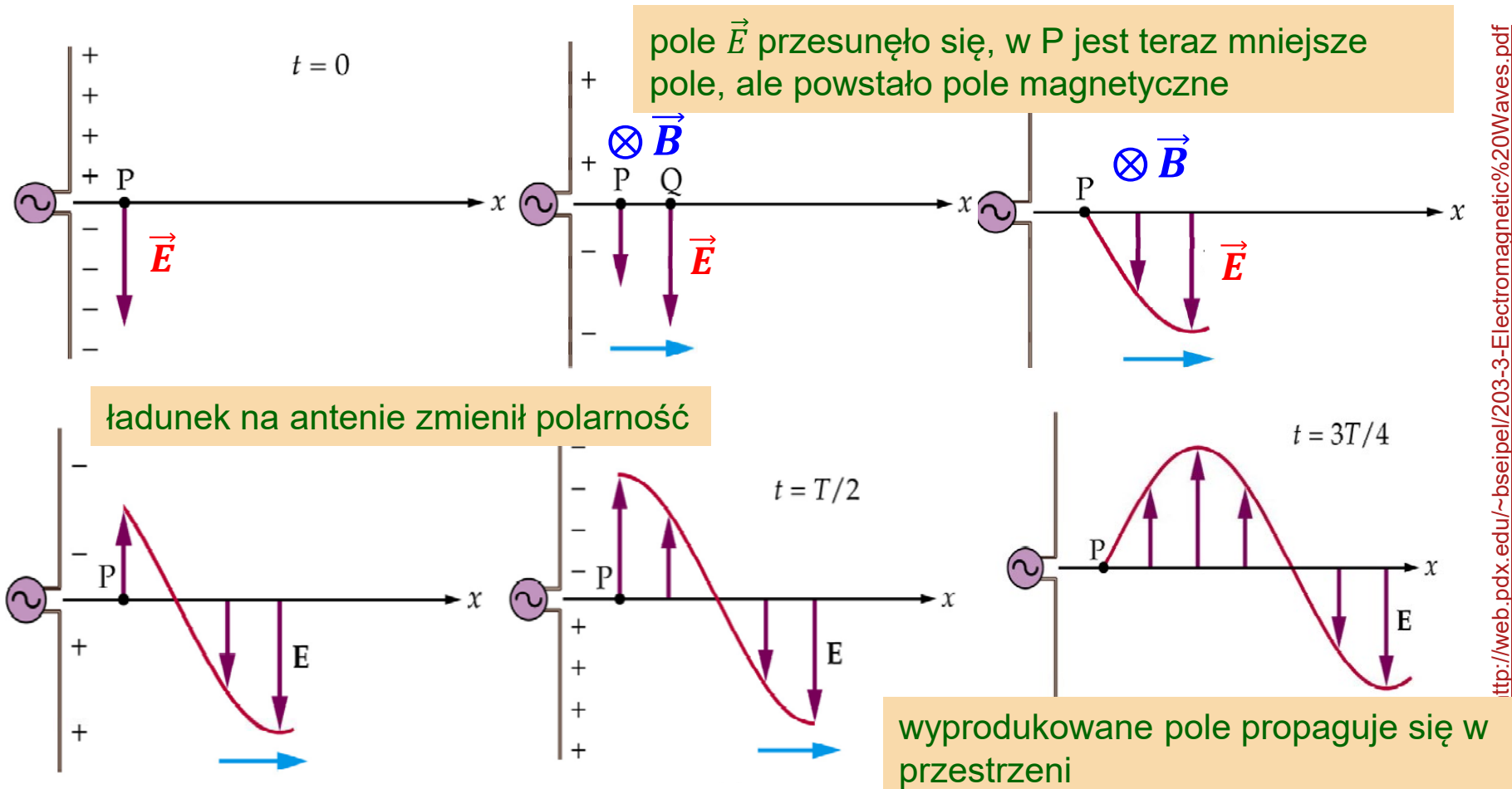
- Zmieniające się pole magnetyczne jest źródłem pola elektrycznego.
- Zmiany pola elektrycznego powodują powstanie wirowego pola magnetycznego – zmiany pola rozchodzą się w przestrzeni!



- 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.**

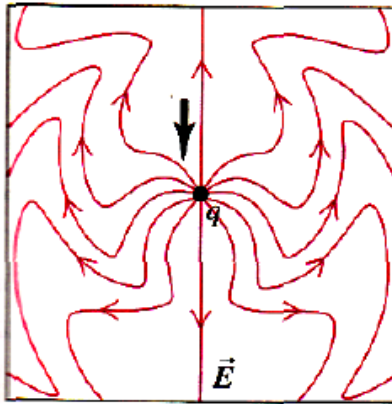
# Falowanie pól

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

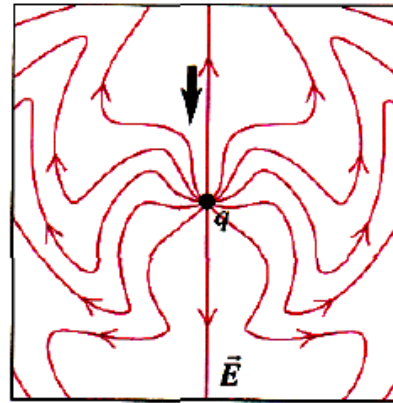


# Linie pola

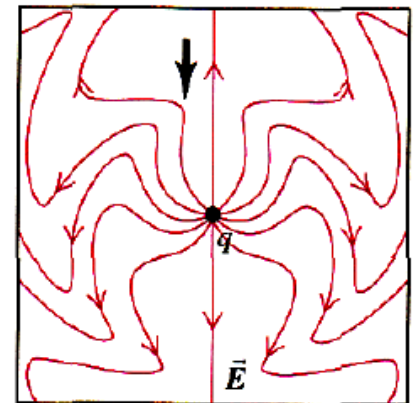
Przyspieszany ładunek wytworzył pole elektrycznie o zmieniających się w czasie liniach:



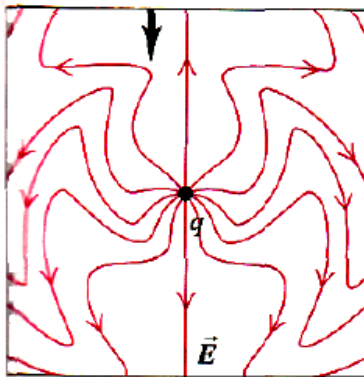
(a)  $t = 0$



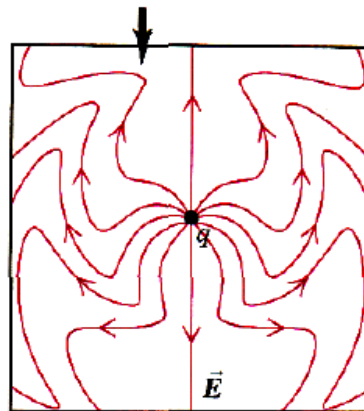
(b)  $t = T/4$



(c)  $t = T/2$



(d)  $t = 3T/4$

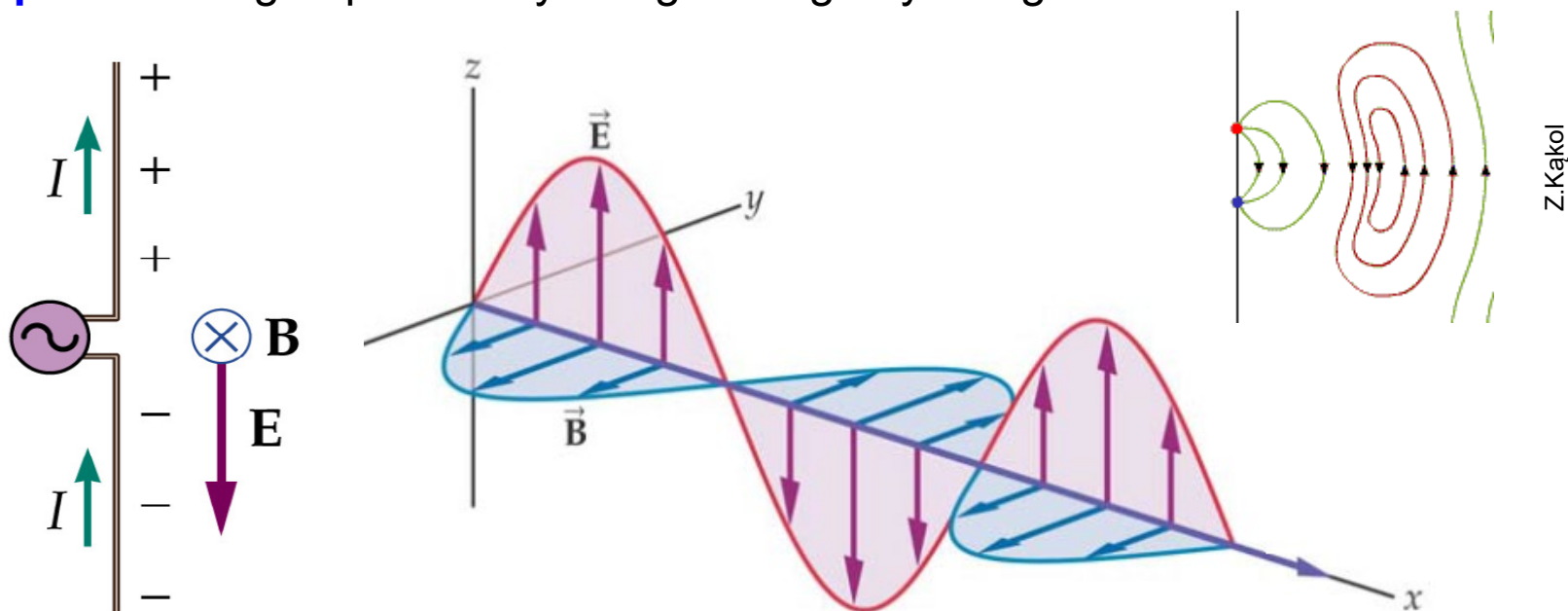


(e)  $t = T$

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

## a teraz pole magnetyczne...

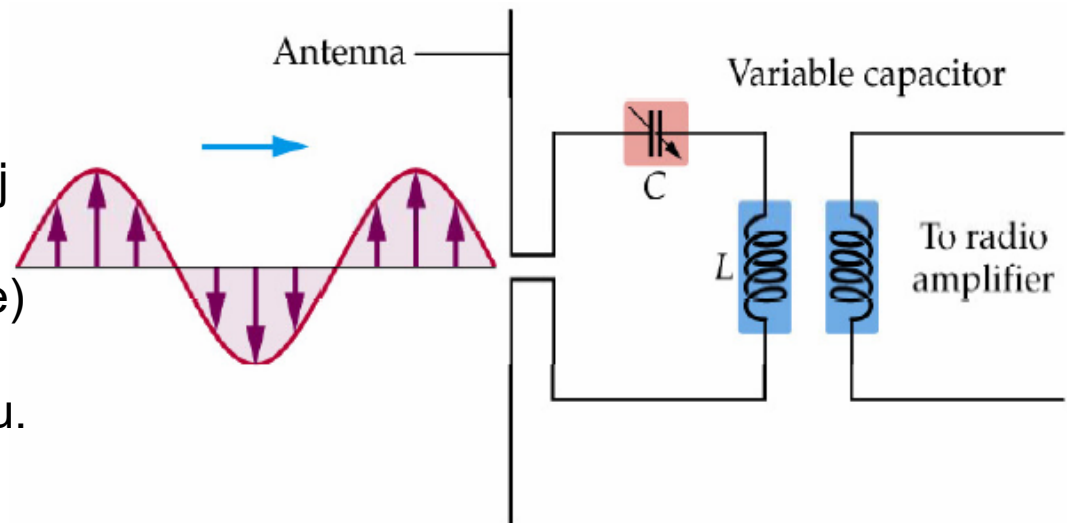
- Pole elektryczne – o natężeniu skierowanym w dół, stało się źródłem pola magnetycznego skierowanego prostopadle, „za tablicę”.
- Pole elektryczne i magnetyczne są **ZAWSZE** prostopadłe do siebie.
- Fala elektromagnetyczna jest falą **płaską**, poprzeczną, rozchodzącą się **prostopadle** do drgań pól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



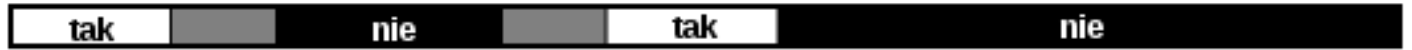
# Zastosowania fal elm

- **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) .
- Chociaż do każdego zastosowania 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  $\vec{B}$  !!!

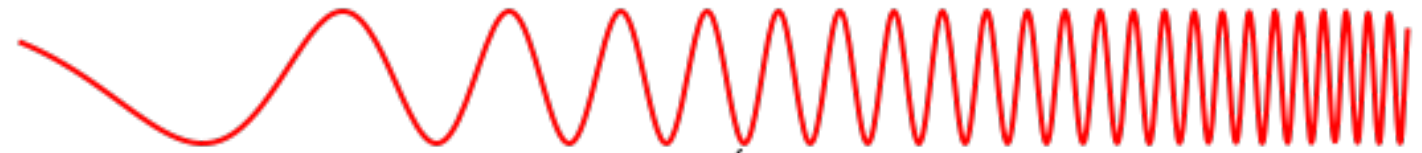


# Widmo fali elm

Przenika atmosferę ziemską?

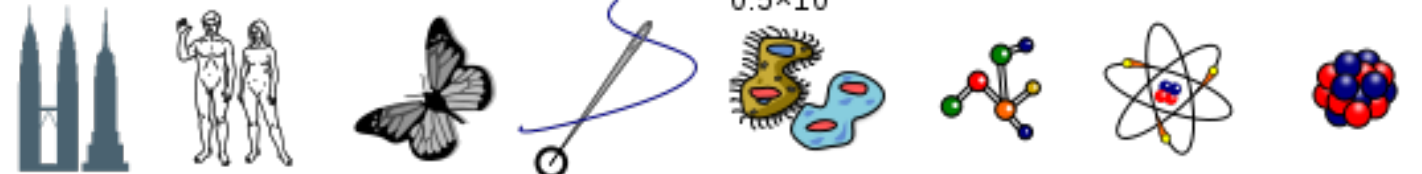


Typ promieniowania  
Długość fali (m)



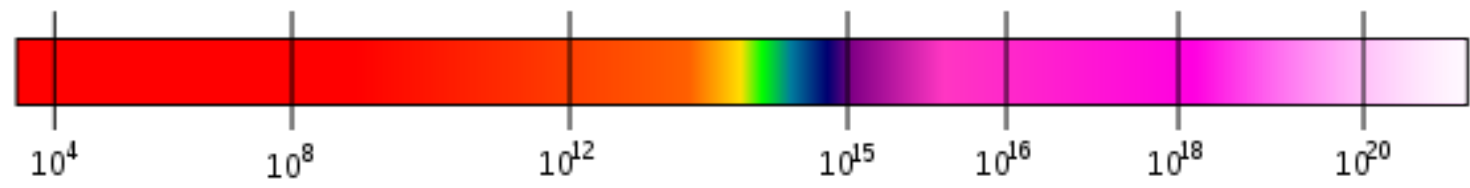
**radiowe**  $10^3$       **mikrofałe**  $10^{-2}$       **podczerwień**  $10^{-5}$       **światło widzialne**  $0.5 \times 10^{-6}$       **ultrafiolet**  $10^{-8}$       **rentgenowskie**  $10^{-10}$       **gamma**  $10^{-12}$

Ciało o skali zbliżonej do długości fali

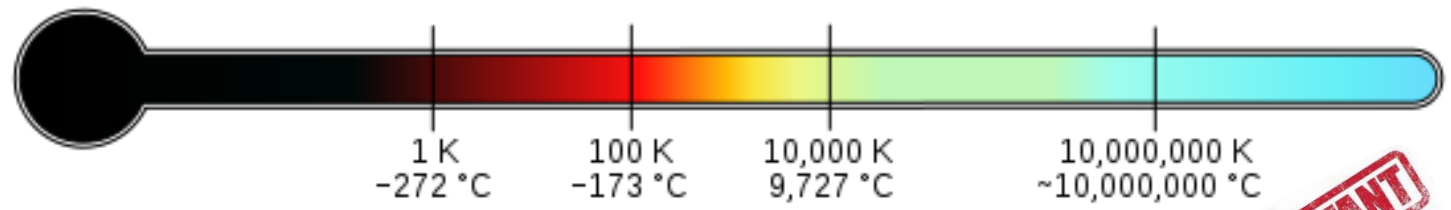


budynki      człowiek      motyl      ostrze igły      pierwotniaki      molekuly      atomy      jądra atomowe

Częstotliwość (Hz)



Temperatura ciała, którego maksimum promieniowania jest w danej długości fali



zastosowania: przeczytaj <https://openstax.org/tom-2>



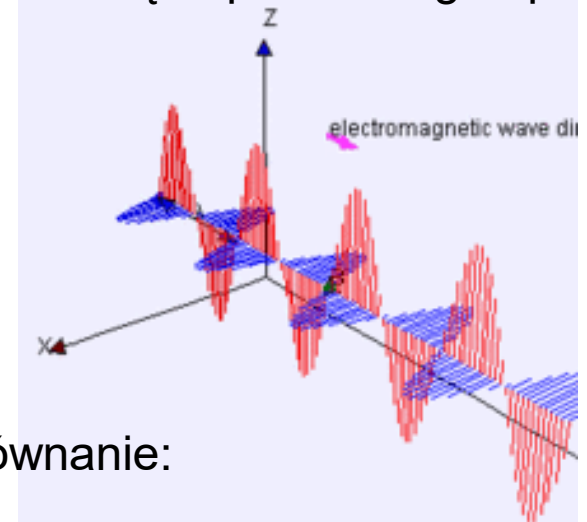
# Równania falowe

- 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  $\vec{B}$ :

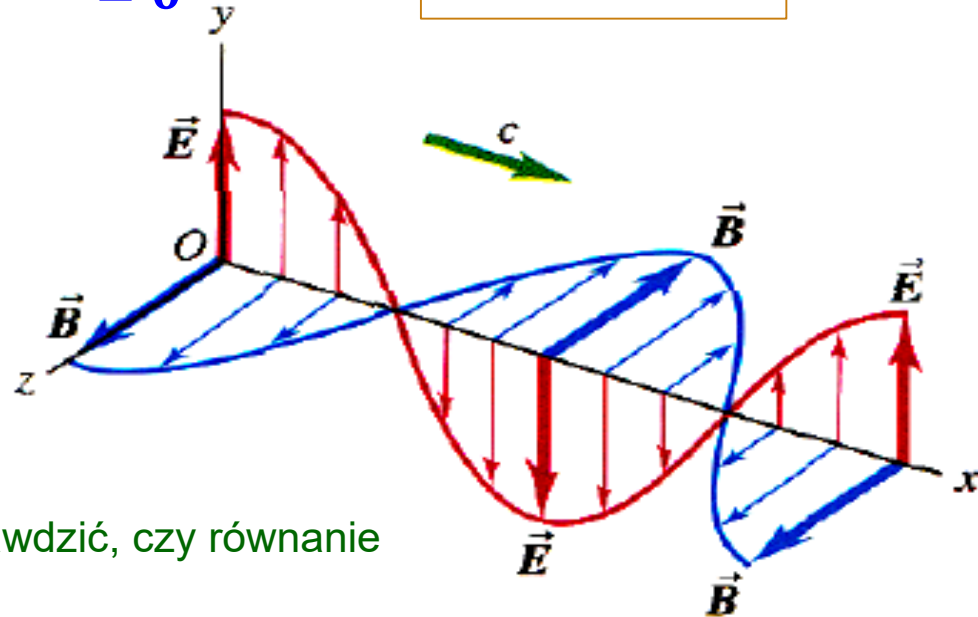
$$\frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial x^2} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

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

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

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

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



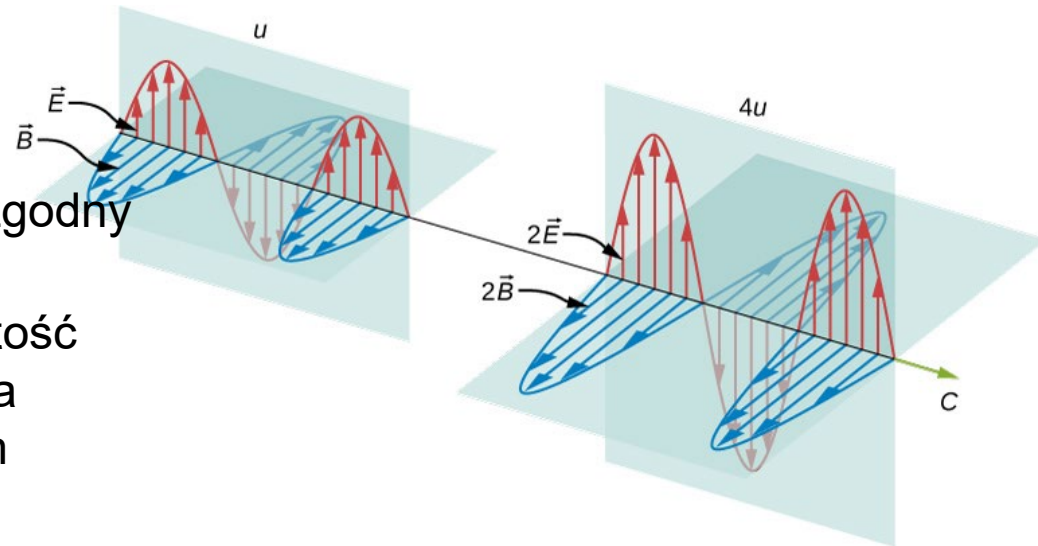
jak zwykle zgadując rozwiązanie, należy sprawdzić, czy równanie jest spełnione!

# 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:



skoro:  $E = c B$  :

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

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

żagiel słoneczny

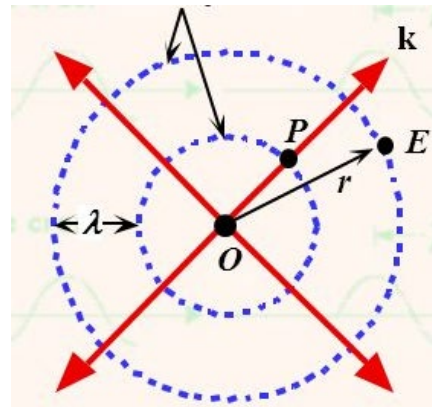
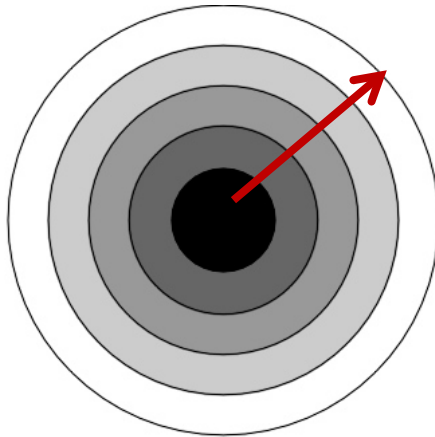
# Natężenie promieniowania

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  $E^2$

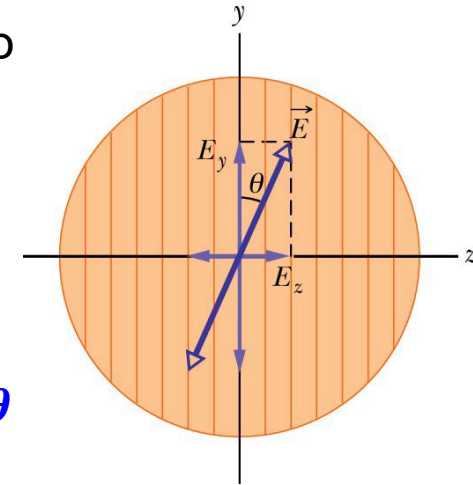
- Jeśli mamy punktowe źródło fali – emituje ono energię jednorodnie we wszystkich kierunkach, a powierzchnie falowe tworzą sferę:



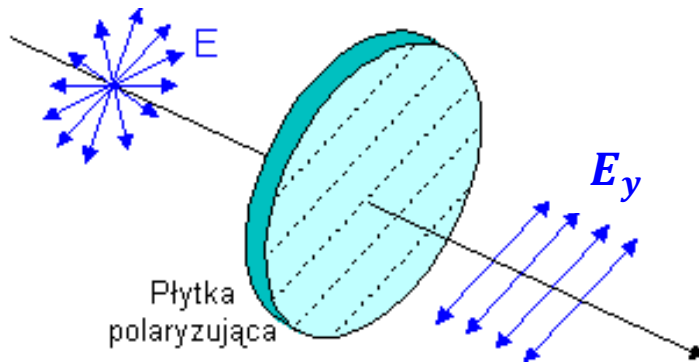
natężenie promieniowania maleje z odległością:  $I(r) = \frac{P_0}{4\pi r^2}$

# Polaryzacja

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

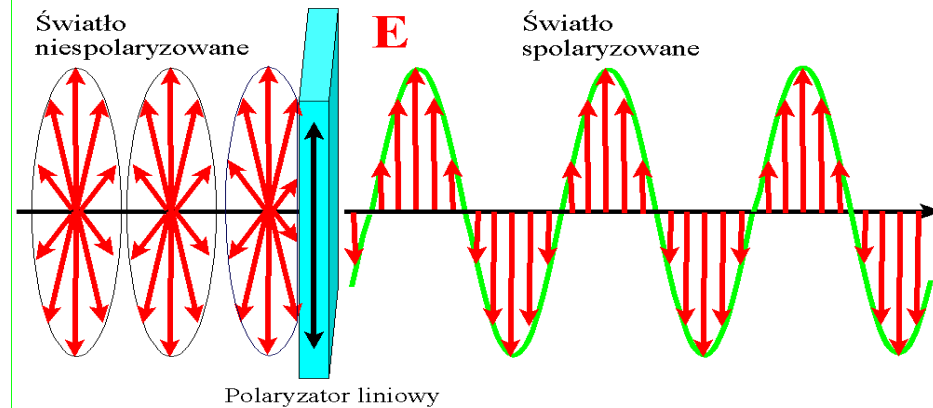


$$E_y = E \cos \theta$$



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

## Polaryzacja liniowa fali elektromagnetycznej

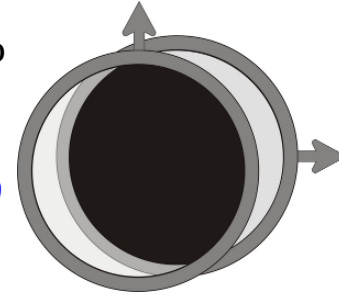


[http://www.if.pw.edu.pl/~bibliot/archiwum/adamczyk/WykJLadyFO/FoWwww\\_43.html](http://www.if.pw.edu.pl/~bibliot/archiwum/adamczyk/WykJLadyFO/FoWwww_43.html)



# 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  $\alpha_p$ , dla którego wiązka odbita jest całkowicie spolaryzowana liniowo w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania.

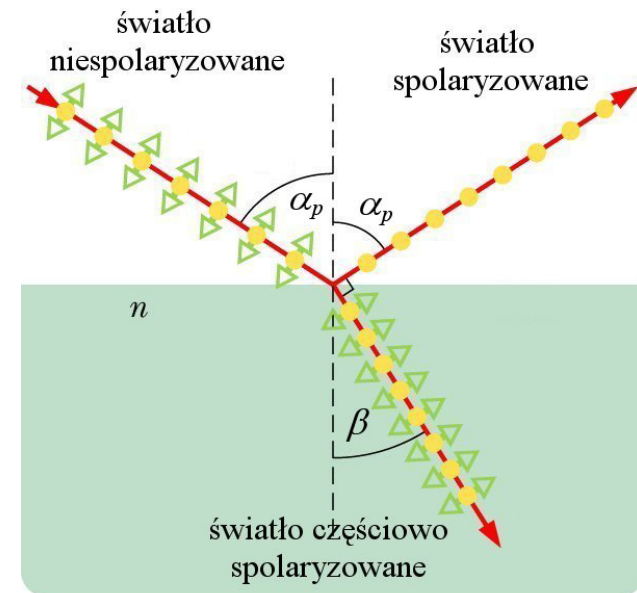
Gdy kąt padania jest równy kątowi całkowitej polaryzacji to wówczas wiązka odbita i załamana tworzą kąt prosty

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

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

kąt Brewstera

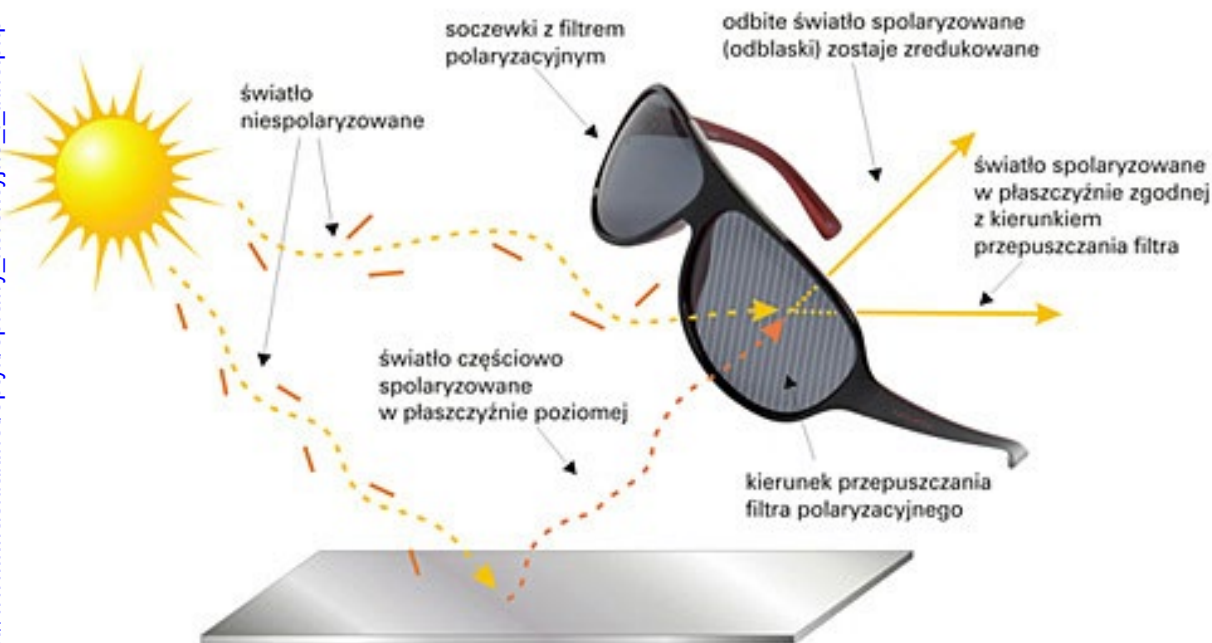
dla  $n = 1.5$  otrzymujemy  $\alpha_p = 56^\circ$



- składowa prostopadła
- ◄► składowa równoległa

# Praktyka polaryzacji światła

[http://www.kwasniak.net/optyk/oprawy\\_korekcyjne\\_i\\_inne.php](http://www.kwasniak.net/optyk/oprawy_korekcyjne_i_inne.php)



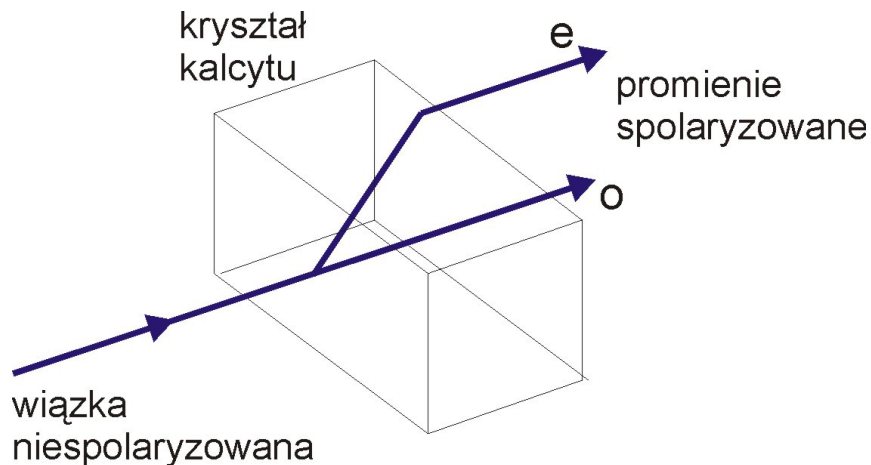
**Z POLARYZACJĄ**



**BEZ POLARYZACJI**

# Dwójłomność

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

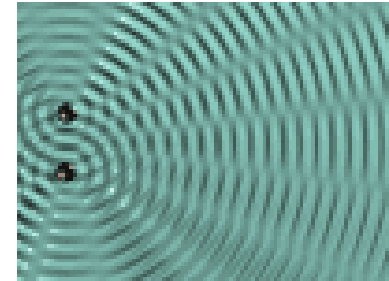


Promień zwyczajny (o) i promień nadzwyczajny (e) są spolaryzowane liniowo, przy czym ich płaszczyzny drgań są wzajemnie prostopadłe.

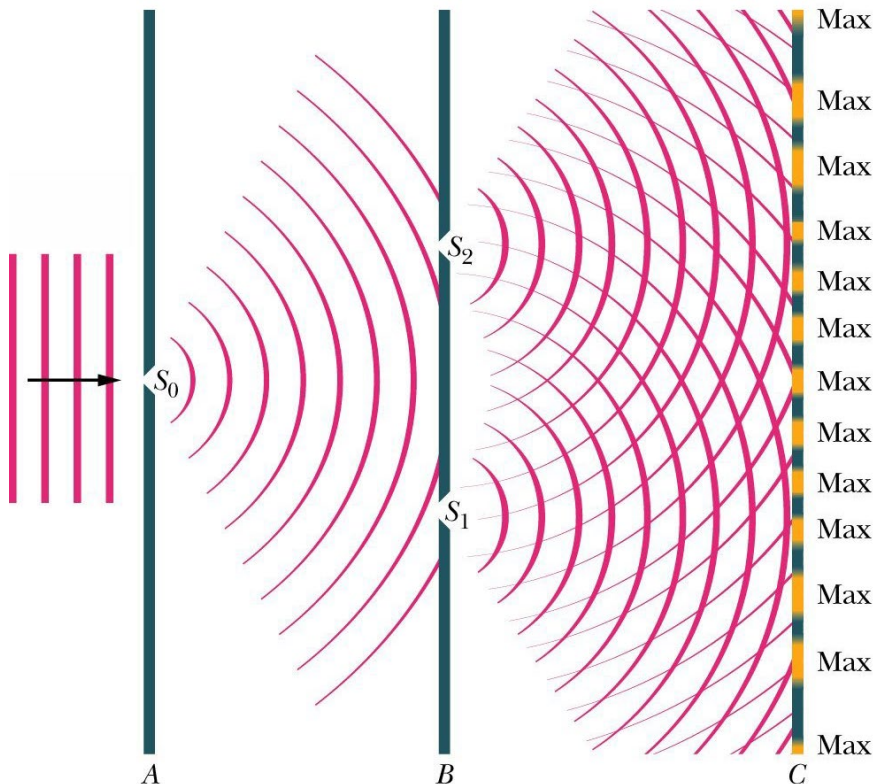
Niektóre podwójnie załamujące kryształy wykazują ponadto własność nazywaną **dichroizmem**. Kryształy te pochłaniają jeden z promieni (o lub e) silniej niż drugi. Na wykorzystaniu tego zjawiska opiera się działanie szeroko stosowanych polaroidów.

# Interferencja fal

- Nakładanie się (interferencja) fal



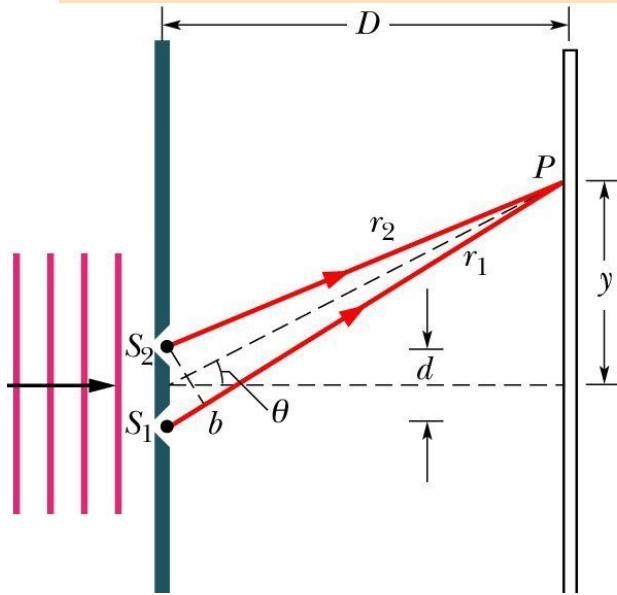
## Doświadczenie Younga



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



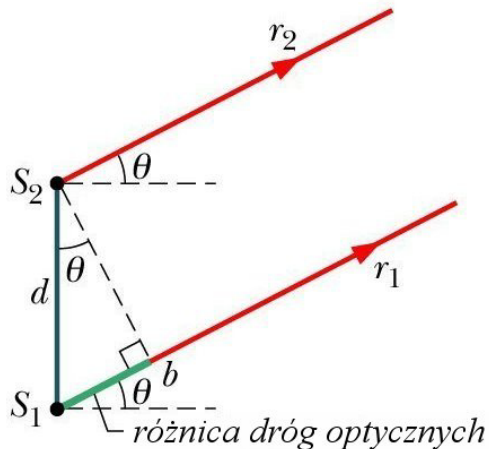
Warunek na maksimum:

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

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

Minimum natężenia światła

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

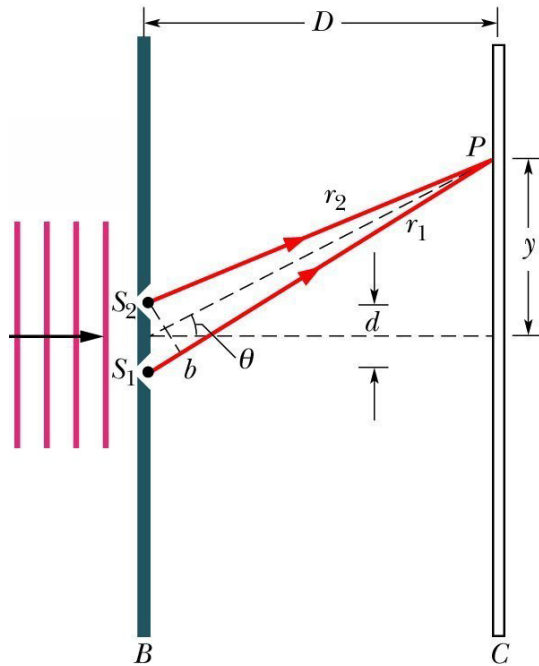


$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, \dots \text{ (minima)}$$

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

Tak Young wyznaczył długości fal światła widzialnego.

# Interferencja – fala wypadkowa



$$E_1 = E_0 \sin(kr_1 - \omega t)$$

$$E_2 = E_0 \sin(kr_2 - \omega t)$$

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

W punkcie P

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

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

$\varphi$  to różnica **faz** jaka powstaje na drodze  $\Delta r$

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

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

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**.

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

$$E = E_1 + E_2$$

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

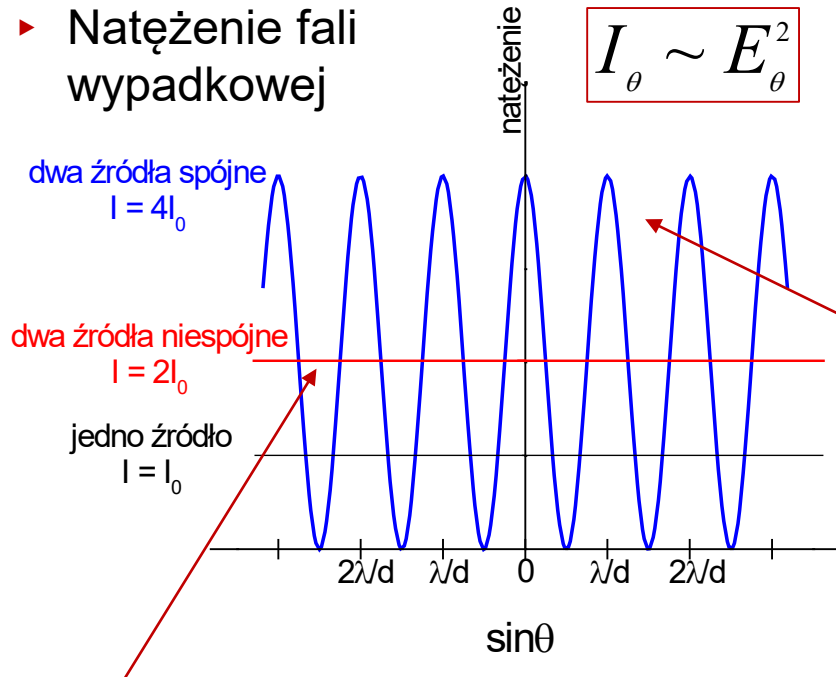
gdzie

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

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

# Interferencja – natężenie fali

- Natężenie fali wypadkowej



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

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

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

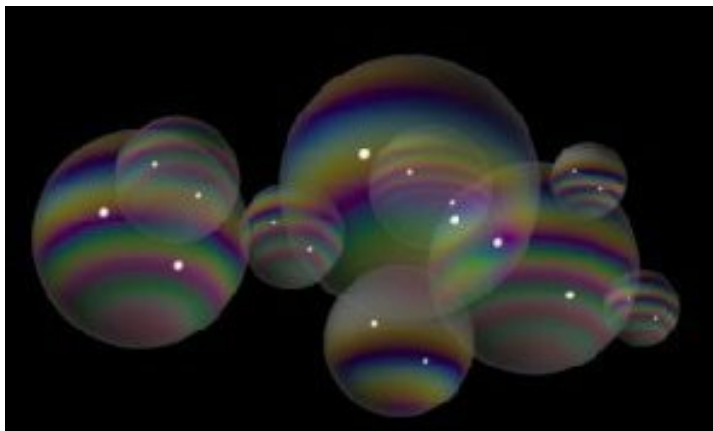
$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \left( \frac{E_{\theta}}{E_0} \right)^2 = (2 \cos \beta)^2$$

Dla fal spójnych (np. laser) najpierw **dobajemy 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

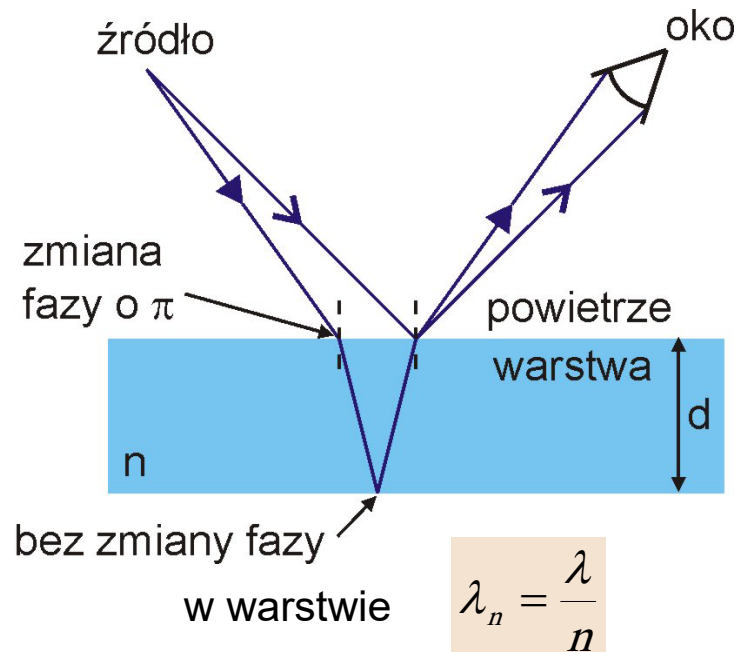


Warunki interferencyjne  
(normalne padanie)

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

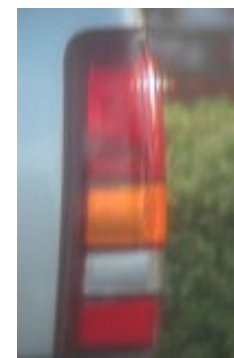
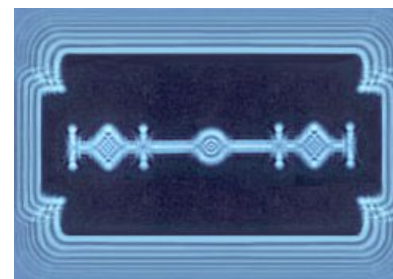
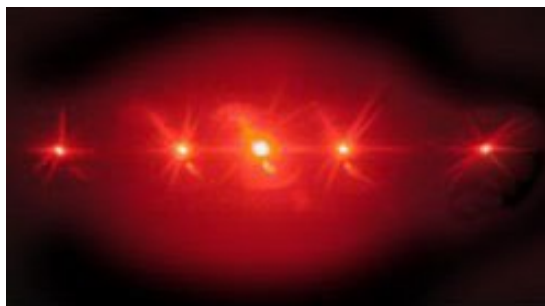
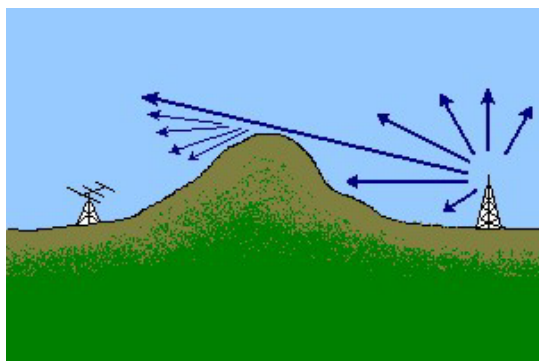
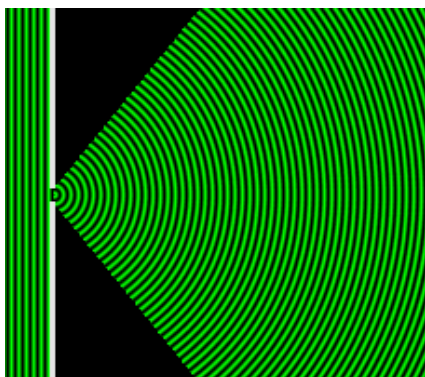
$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots (\text{maksima})$$

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



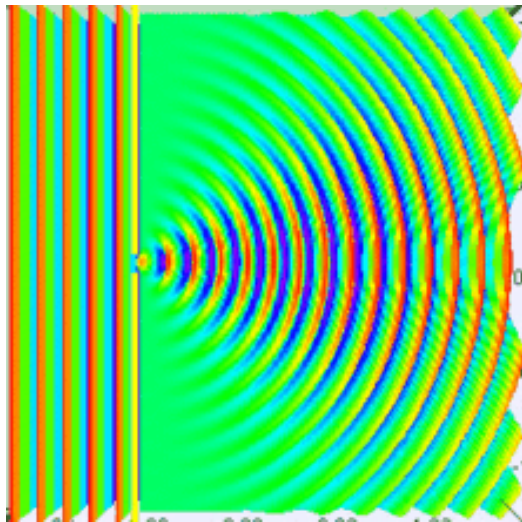
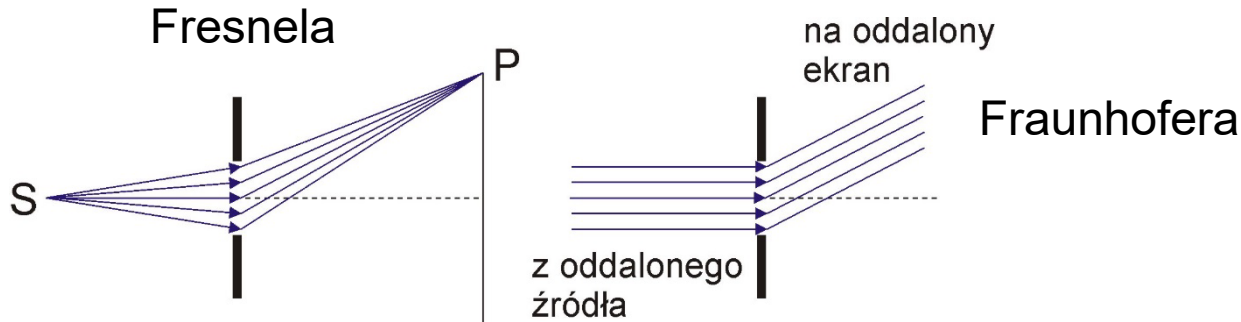


# Dyfrakcja (ugięcie) fali

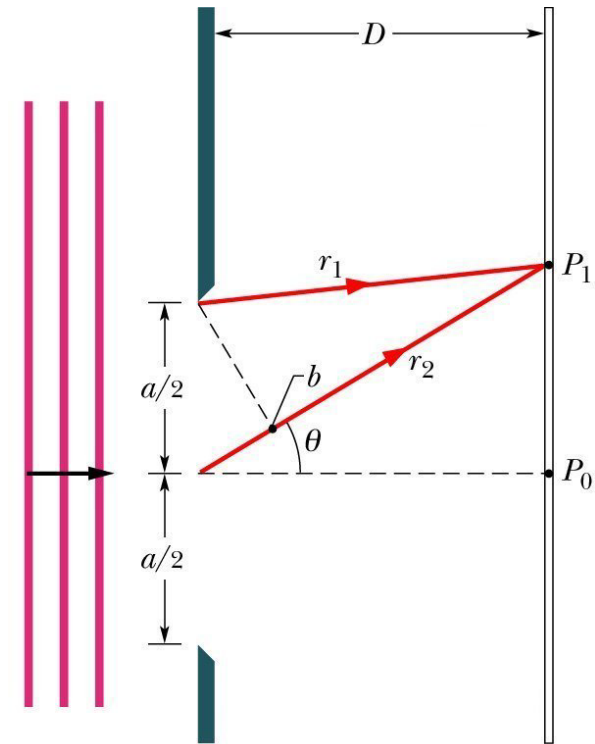


# Dyfrakcja fali

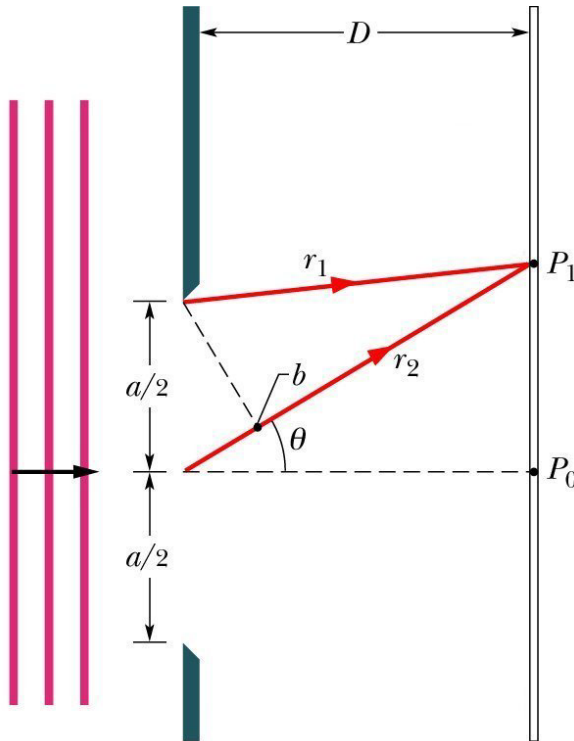
- Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



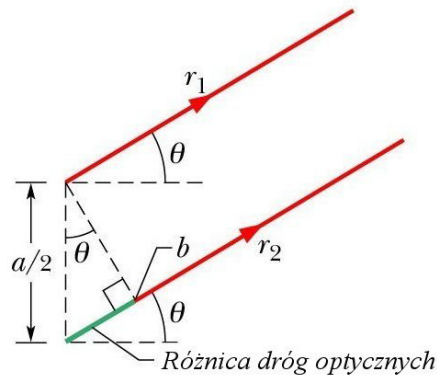
Natężenie w punkcie  $P$  obliczamy dodając do siebie zaburzenia falowe (wektory  $\vec{E}$ ) docierające z różnych punktów szczeliny.



# 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

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

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

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

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

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

$$m = 1$$

$$m = 2$$

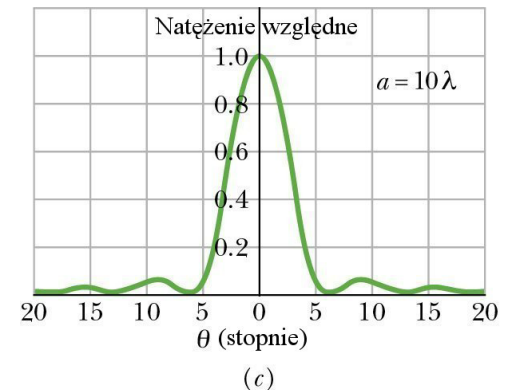
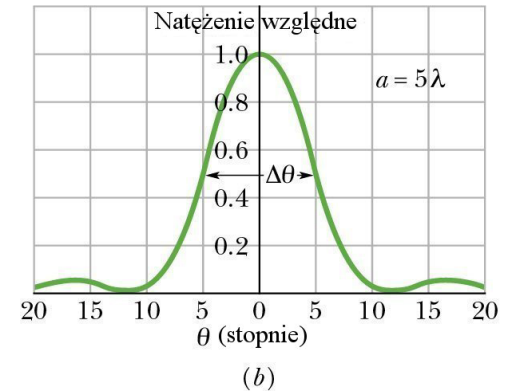
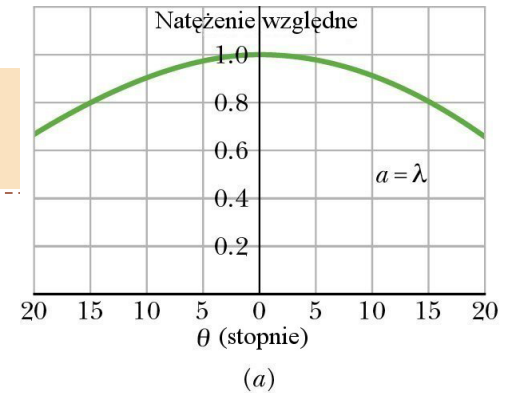
$$m = 3$$

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

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

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

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...

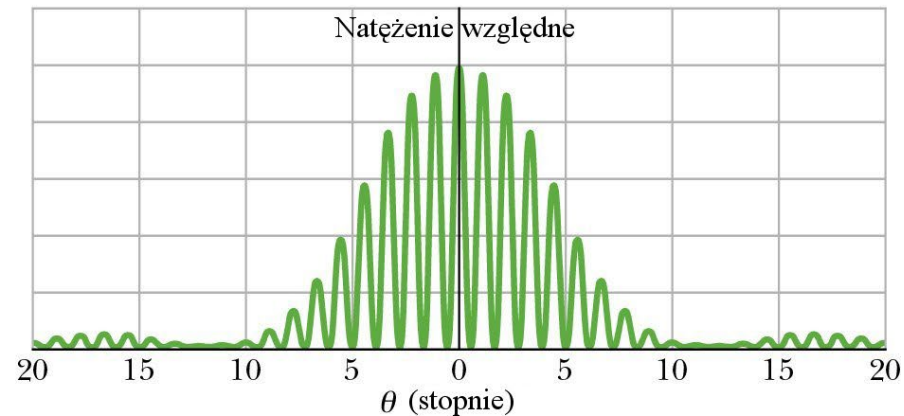
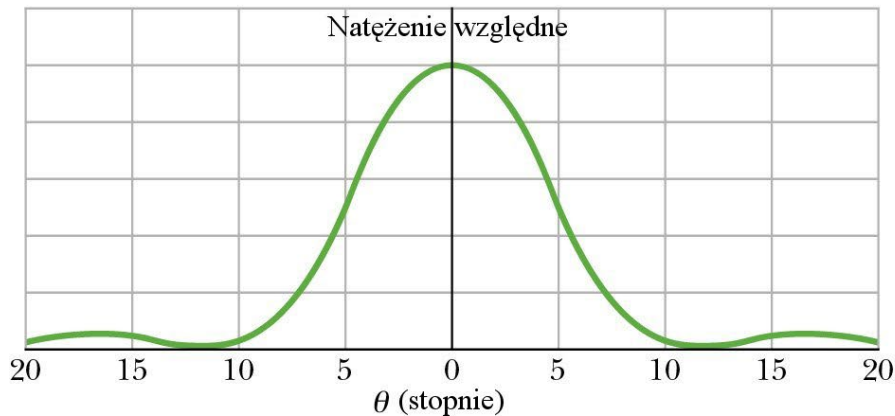
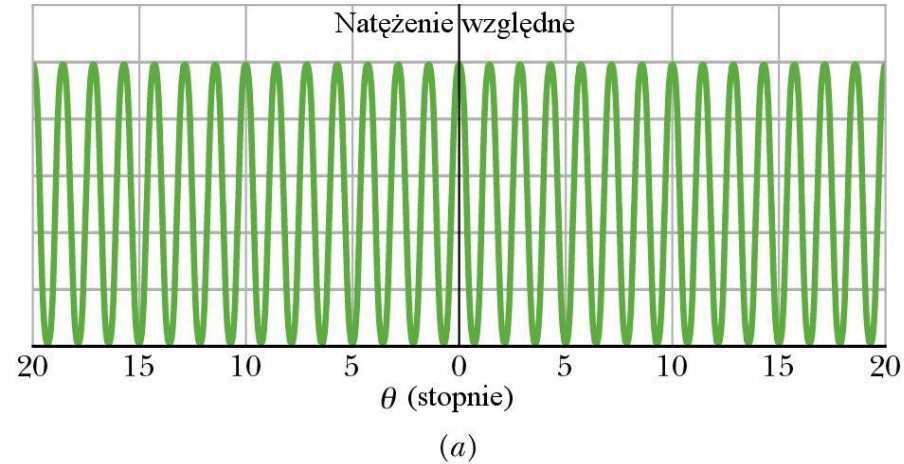
$$I_{Dyfr,\theta} = I_m \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

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

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

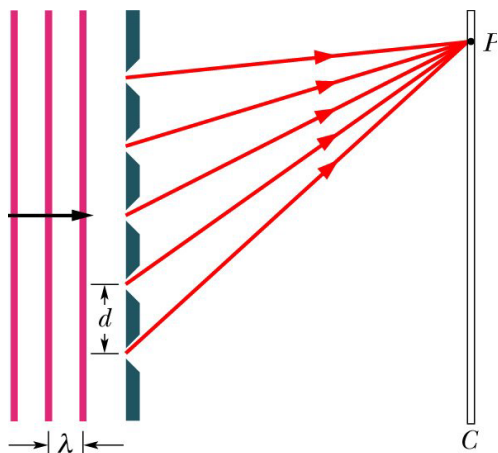
$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

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



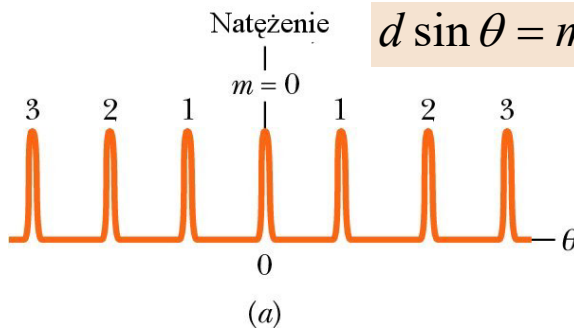
# Siatka dyfrakcyjna

- ▶ Siatka dyfrakcyjna – interferencja z wielu źródeł



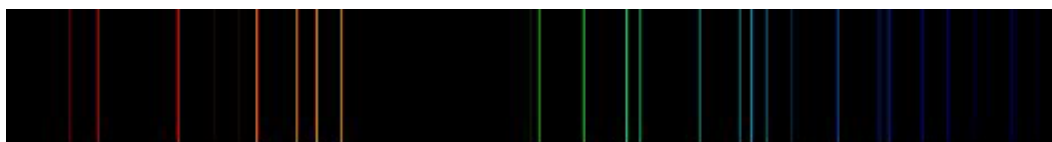
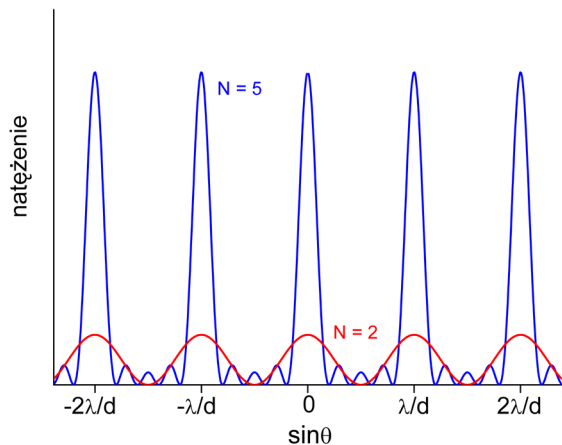
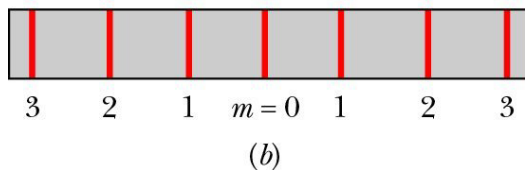
Nie zmienia się odległości pomiędzy głównymi maksimami. Obserwujemy **wzrost natężenia maksimów głównych**.

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



$d$  - 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**”

