



**Proszę o uwagę**

# 24. Optyka falowa

---

- Zasada Huygensa,
- interferencja,
- spójność fal,
- dyfrakcja,
- polaryzacja światła – stan i stopień polaryzacji,
- ośrodki anizotropowe – elementy dwójłomne,
- idea holografii.

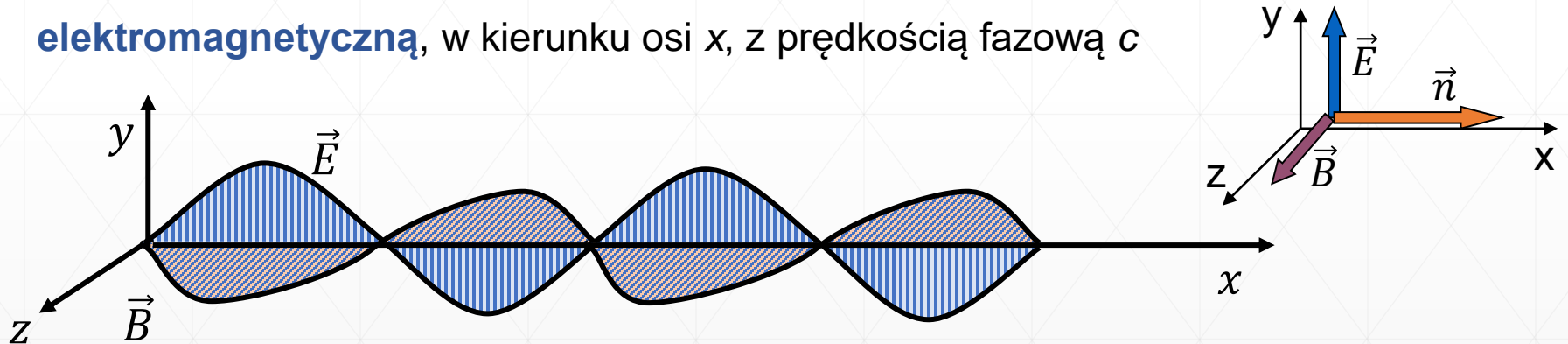


# Światło jako fala elektromagnetyczna

- Z równań Maxwella wynika, że wokół płaszczyzny przez którą płynie prąd zmienny w czasie powstają pola magnetyczne i elektryczne, spełniające równanie falowe,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$
$$B_z(x, t) = B_0 \cos \omega (t - x/c)$$
$$E_y(x, t) = E_0 \cos \omega (t - x/c)$$

tnz. pola magnetyczne i elektryczne rozchodzą się w postaci fali, zwanej **falą elektromagnetyczną**, w kierunku osi  $x$ , z prędkością fazową  $c$



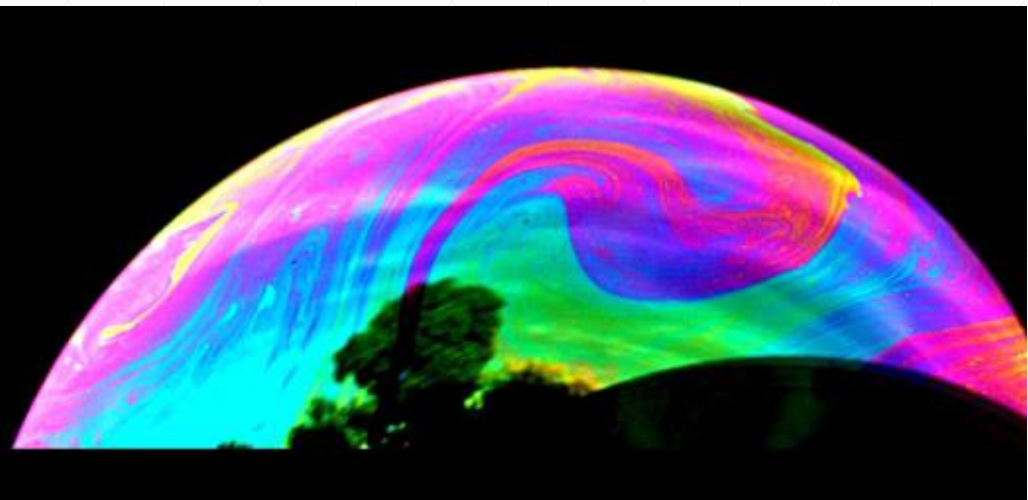
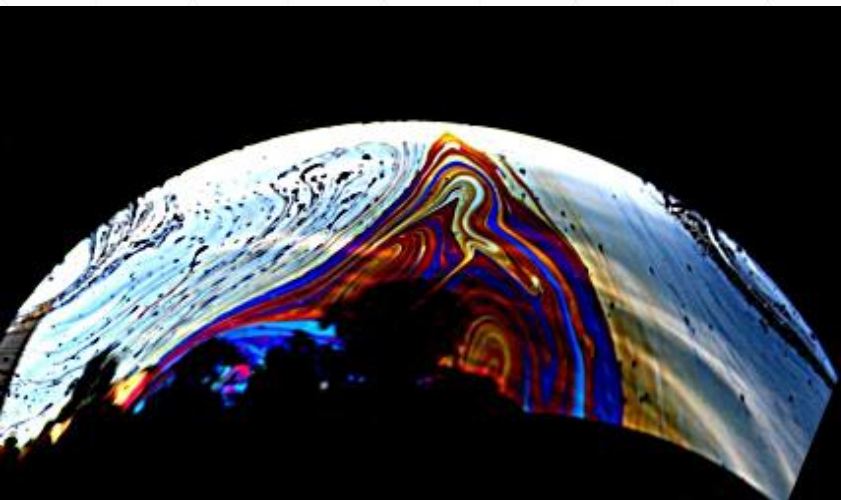
- pola te są wzajemnie prostopadłe do siebie i do kierunku rozchodzenia się tych pól w przestrzeni (kierunku propagacji fali), tzn.  $B_z \perp E_y \perp \vec{n}$
- prędkość fazowa fali równa jest prędkości światła  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

# INTERFERENCJA ŚWIATŁA



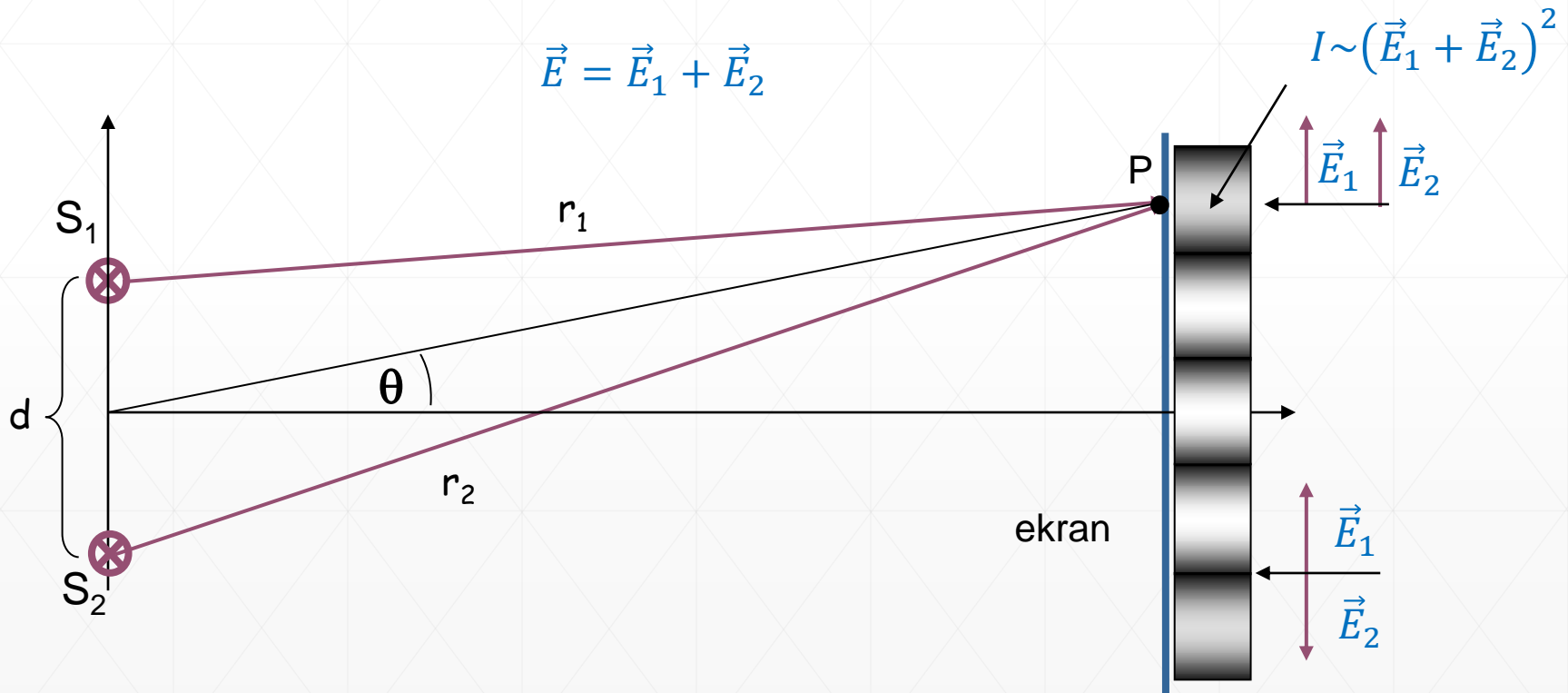
W zjawisku interferencji nakładanie się fal prowadzi albo do wzmocnienia, albo do wygaszenia światła o pewnych barwach, np. bańki mydlane

[„Fizyka dla szkół wyższych – tom 3”, [www.openstax.pl](http://www.openstax.pl)]



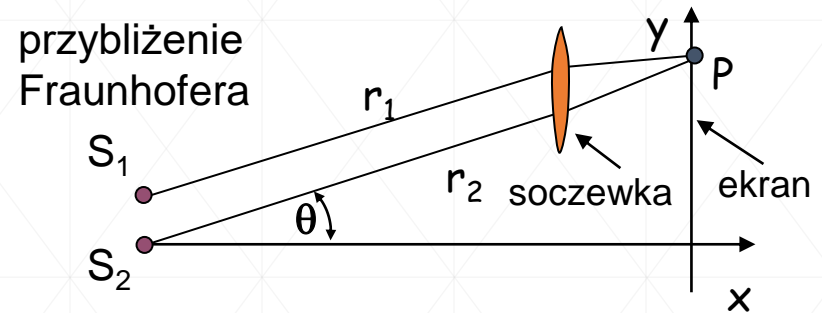
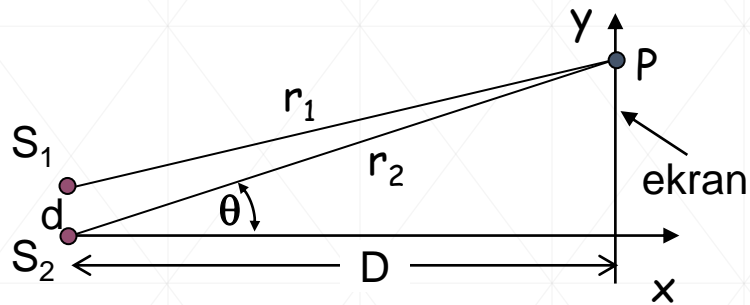
# Interferencja fal wysyłanych przez dwa źródła punktowe

Jeśli do punktu przestrzeni dochodzą 2 fale, to chwilowe pole elektryczne w tym punkcie będzie sumą wektorową natężeń pola elektrycznego obu fal



Jaka jest zależność natężenia fali elektromagnetycznej na ekranie od położenia punktu obserwacji?

# Interferencja fal - suma amplitud



Do P, w zależności od kąta  $\theta$  dochodzi światło ze źródeł  $S_1$  i  $S_2$  z różnymi fazami:

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \cos(kr_1 - \omega t) + E_0 \cos(kr_2 - \omega t)$$

Różnica faz:  $\phi = \phi_2 - \phi_1 = (kr_2 - \omega t) - (kr_1 - \omega t) = k(r_2 - r_1) = k\Delta r$

Różnica faz równa jest różnicy dróg optycznych

$$E = 2E_0 \cos\left(k \frac{(r_1 + r_2)}{2} - \omega t\right) \cos k \frac{(r_1 - r_2)}{2} = 2E_0 \cos(kr - \omega t) \cos k \frac{\Delta r}{2}$$

$$E = \underbrace{2E_0 \cos \frac{\phi}{2}}_A \cos(kr - \omega t)$$

$|A| = \text{max}$  gdy

$$\frac{\phi}{2} = n\pi$$

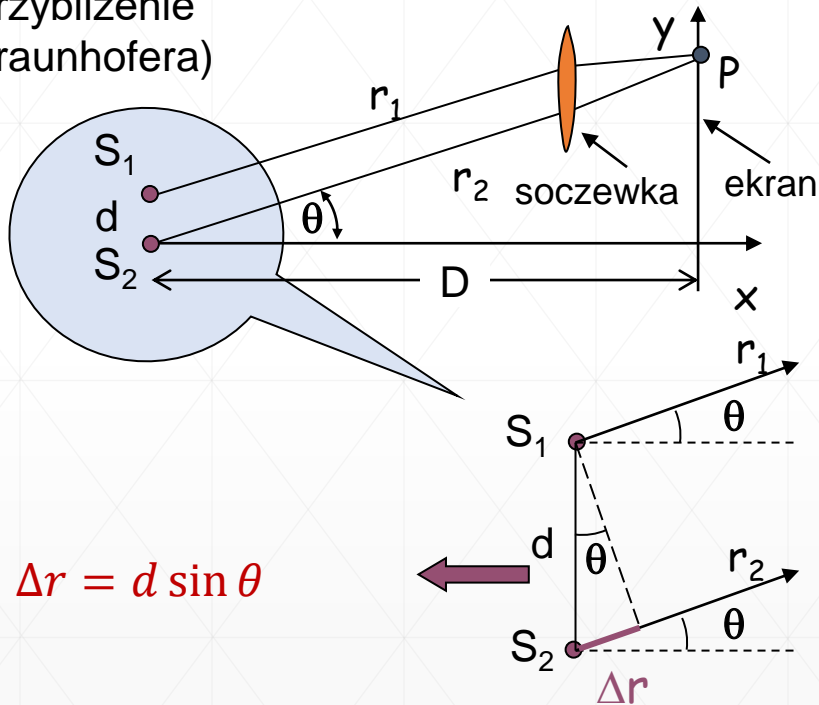
$A$  – amplituda fali wypadkowej

czyli wzmocnienie sygnału jeśli

$$\phi = n2\pi$$

# Interferencja fal – warunek wzmocnienia i wygaszenia

Dla  $D \gg d$   
(przybliżenie Fraunhofera)



$$\Delta r = d \sin \theta$$

Wzmocnienie sygnału jeśli

$$\phi = n2\pi$$

$$\phi = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$$

$$\Delta r = n\lambda$$

różnica dróg optycznych jest równa całkowitej wielokrotności długości fali  
czyli

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2)$$

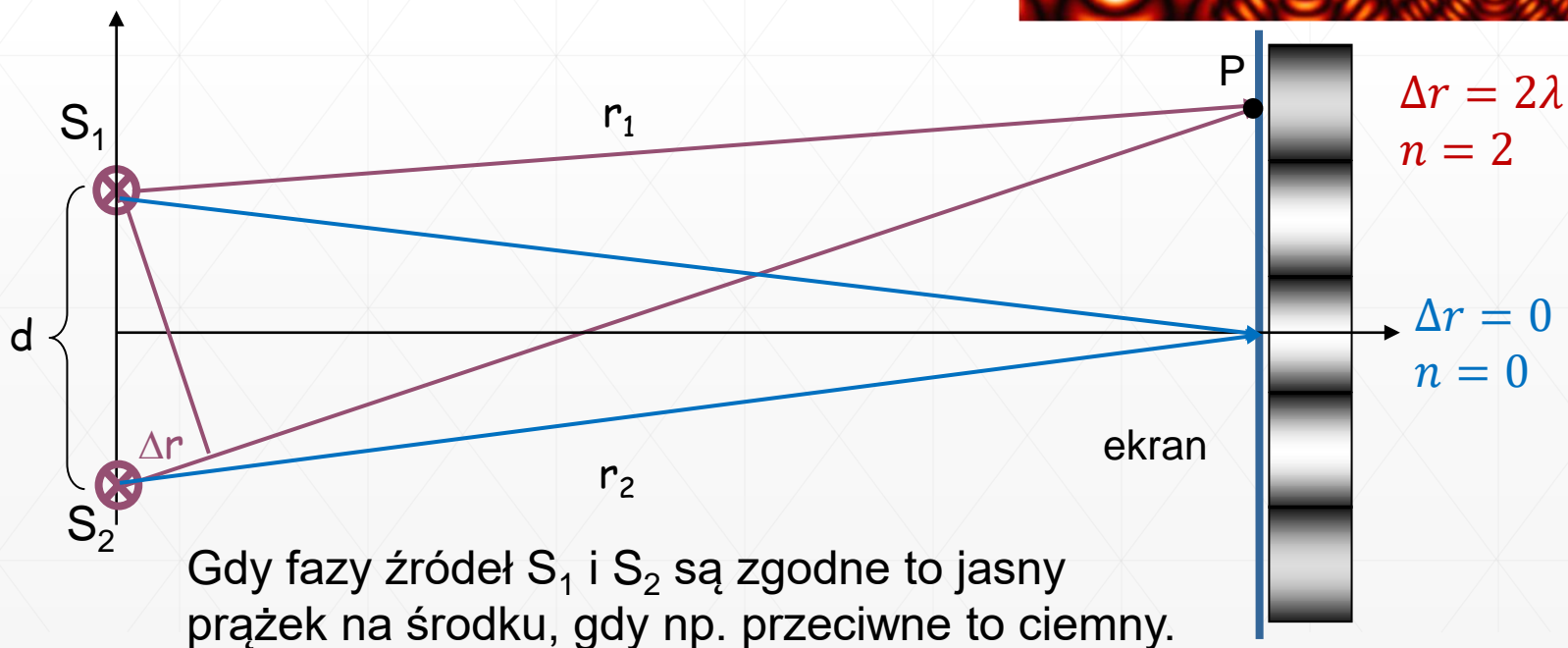
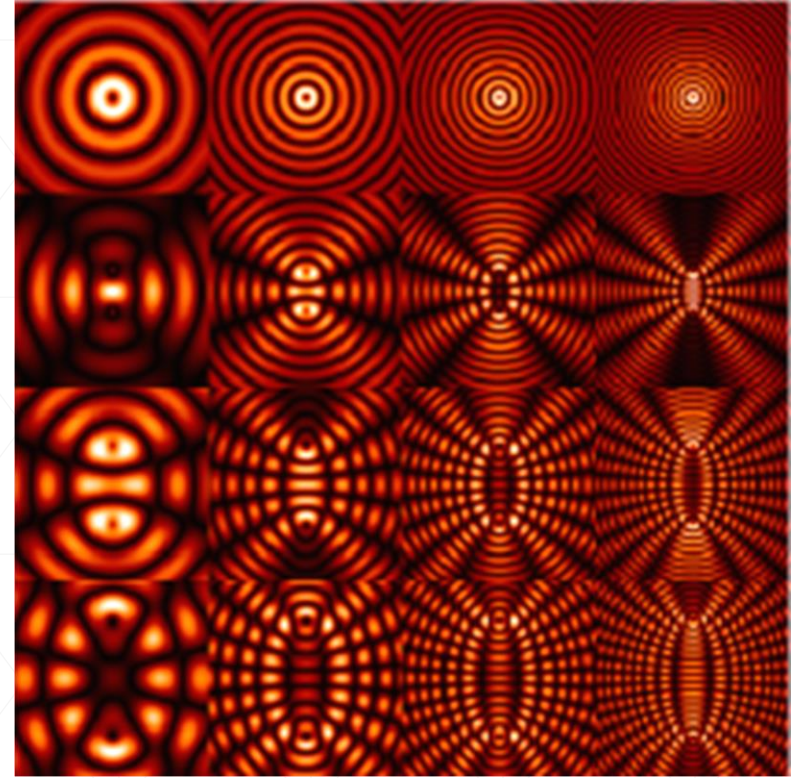
wygaszenie gdy:

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

Interferencja jest podstawowym testem na to, czy jakieś zjawisko ma charakter falowy, czy nie ma

# Interferencja fal

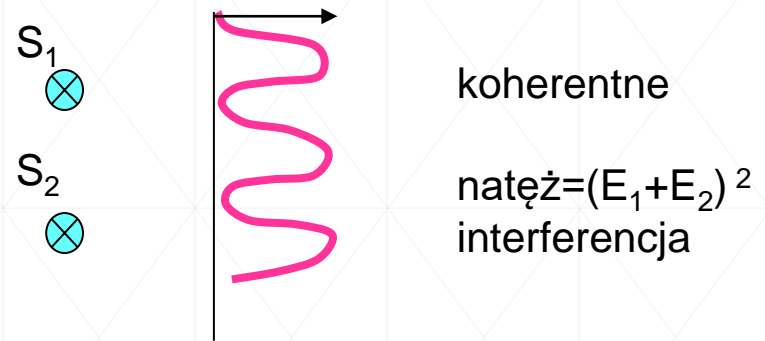
Interferencja – zjawisko powstawania nowego, przestrzennego rozkładu amplitudy fali w wyniku nakładania się dwóch lub więcej fal.





# Koherencja fal – spójność

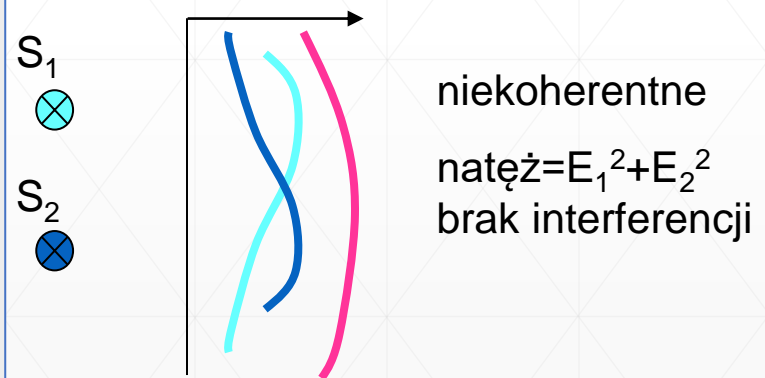
**koherencja światła** – zgodność między fazami w różnych punktach wiązki światła lub w różnych wiązkach tj. różnica faz fal świetlnych docierających do danego punktu jest stała w czasie.  
źródło światła spójnego: [laser](#)



**niekoherentne źródła fal** (np. żarówki, słońce)

brak prążków interferencyjnych

Powód: różnica faz dla fal pochodzących z niekoherentnych źródeł zmienia się w czasie w sposób nieuporządkowany. Natężenie fali (w danym punkcie) jest sumą natężeń od poszczególnych źródeł,

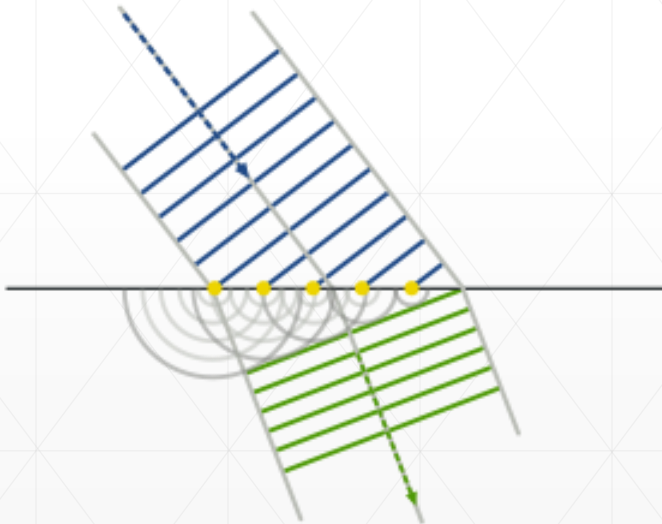


fale spójne:  
natężenie =  $(E_1 + E_2)^2$   
zdolność do interferencji

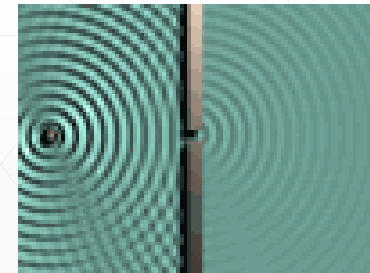
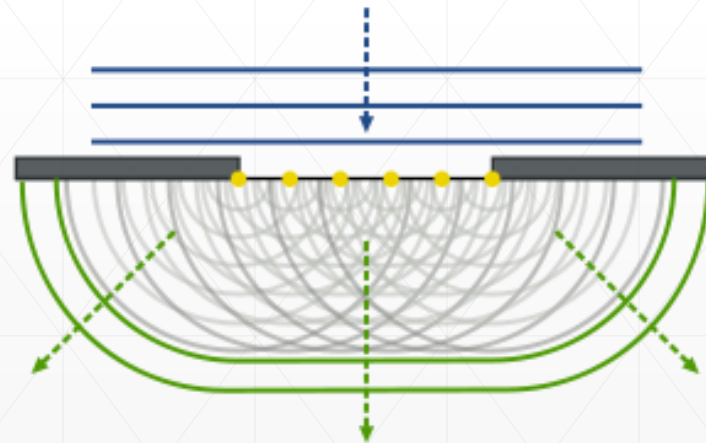
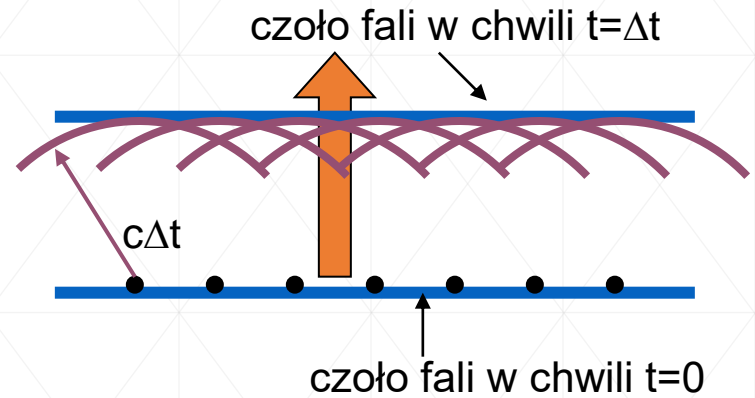
fale niespójne:  
natężenie = natężenie1 + natężenie2  
=  $E_1^2 + E_2^2$

# Zasada Huygensa - ugięcie światła

Zasada Huygensa (1678) – wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych

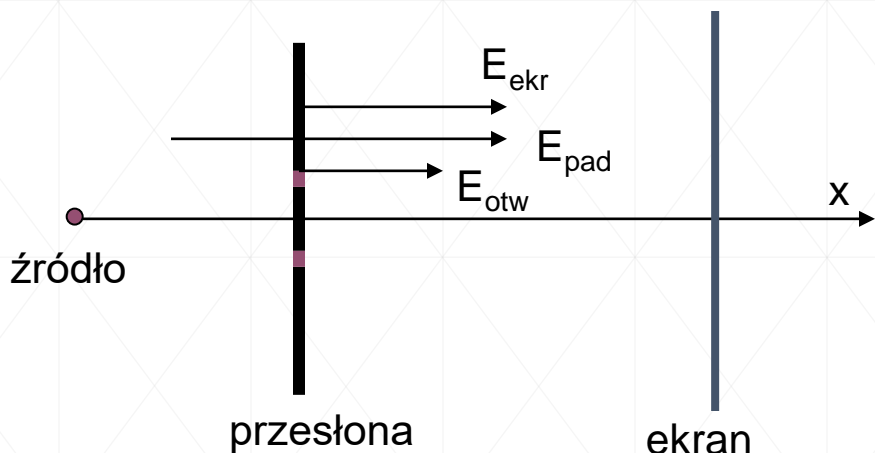


Zasada Huygens'a tłumaczy załamanie fali na granicy ośrodków.



Zasada Huygens'a tłumaczy ugięcie fali na krawędziach i przeszkodach.

# Ugięcie światła na dwóch szczelinach



Doświadczenie Younga – w wyniku oświetlenia dwóch szczelin pojedynczym źródłem światła uzyskujemy taki sam obraz interferencyjny jakby szczeliny były zastąpione przez dwa źródła światła

Wypadkowe pole na prawo od przesłony

$$E_{wyp} = E_{pad} + E_{ekr}$$

po zasłonięciu otworów dodatkowymi ekranami

$$E_{wyp} = E_{pad} + E_{ekr} + E_{otw} = 0$$

$$\begin{aligned} -E_{otw} &= E_{pad} + E_{ekr} \\ |E_{otw}|^2 &= |E_{pad} + E_{ekr}|^2 \end{aligned}$$

**Układ przesłony z dwiema szczelinami jest równoważny dwóm źródłom o powierzchni tych szczelin**

# Dyfrakcja światła

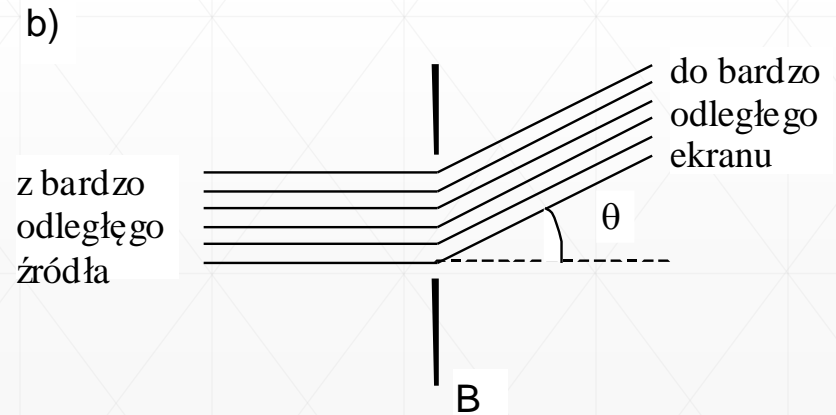
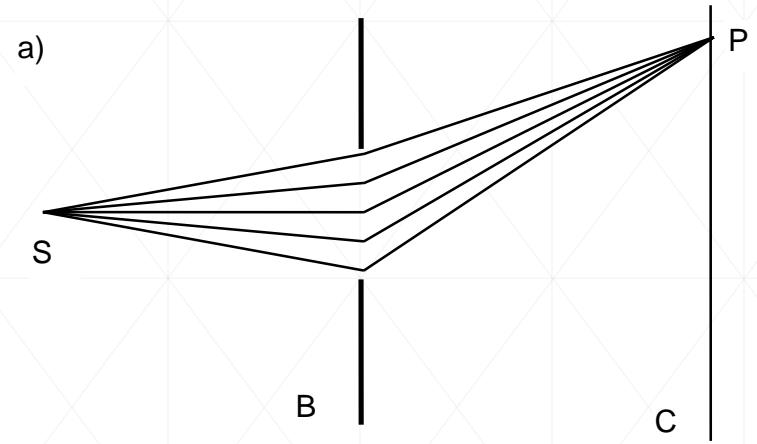
- ugięcie, czyli odchylenie od prostoliniowości rozchodzenia się światła w pobliżu ciał nieprzezroczystych nazywamy **dyfrakcją światła**
- zjawisko to jest tym wyraźniejsze, im rozmiary przeszkody (np. szer. szczeliny) są bardziej zbliżone do długości fali
- w wyniku dyfrakcji powstaje obraz prążków interferencyjnych, zwany obrazem dyfrakcyjnym
- dyfrakcji ulegają fale wszystkich rodzajów, a nie tylko fale świetlne



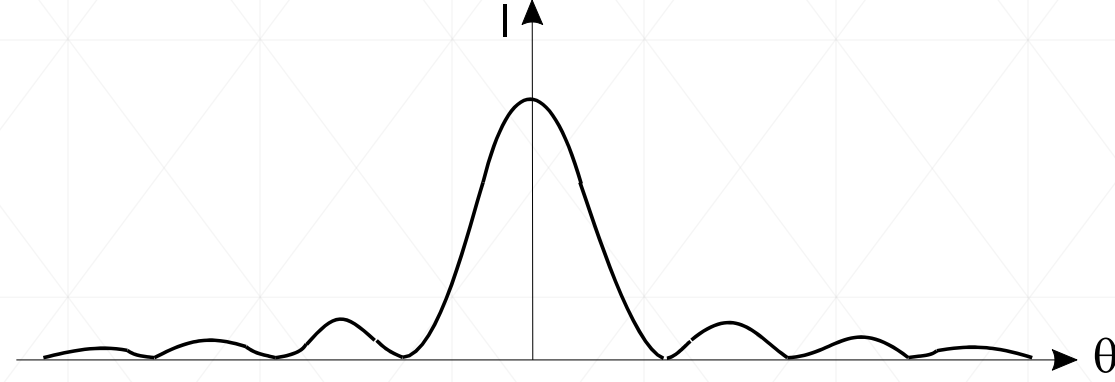
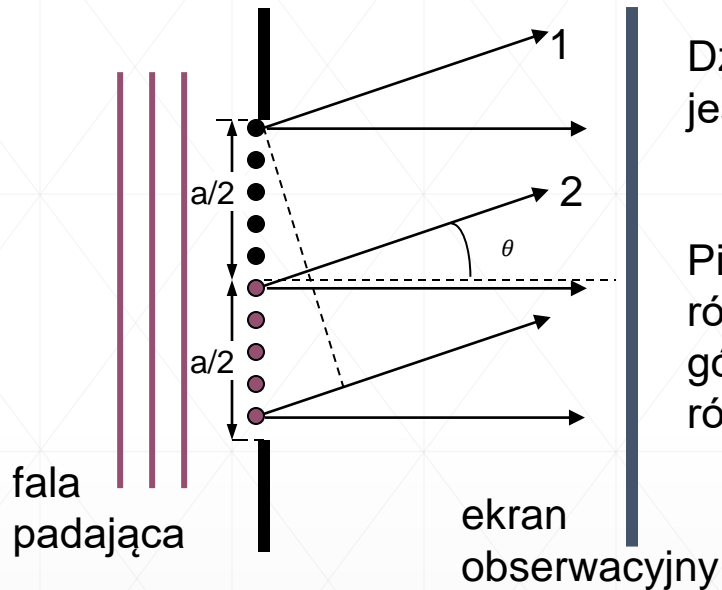
# Rodzaje dyfrakcji

**Dyfrakcja Fresnela** - fale opuszczające otwór nie są płaskie (promienie nie są równoległe) zachodzi to gdy źródło fal  $S$  i ekran  $C$  znajdują się w skończonej (bliskiej) odległości od ekranu za szczeliną  $B$ .

**Dyfrakcja Fraunhofera** - źródło  $S$  i ekran  $C$  znajdują się w dużej odległości od otworu uginającego. Czoła fal padających jak i ugiętych są płaszczyznami (promienie są równoległe)



# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



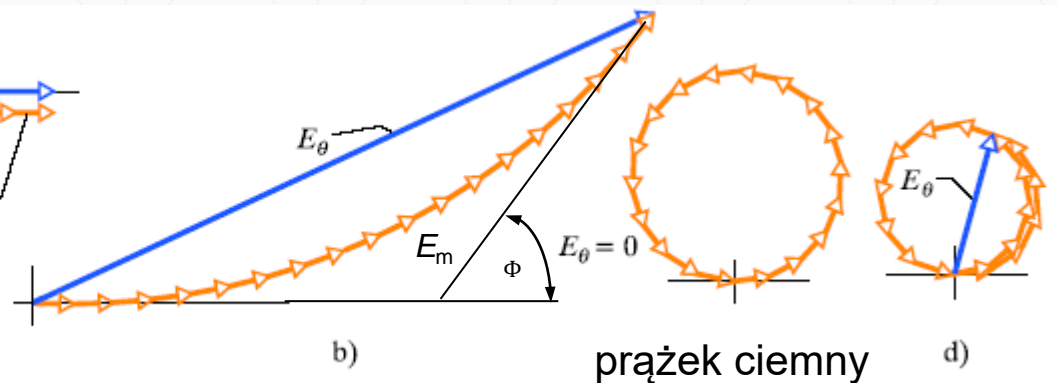
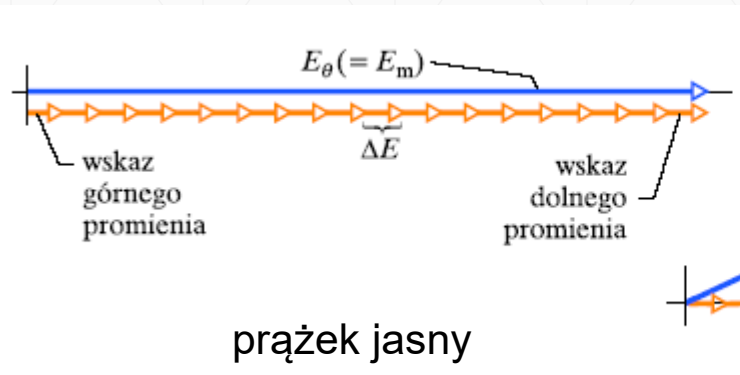
Dzielimy szczelinę na  $N$  stref tak małych, że każda strefa jest źródłem elementarnej fali Huygensa.

Pierwszy prążek ciemny, gdy różnica dróg promieni 1,2 od górnych stref obu obszarów równa jest  $\lambda/2$

$$\frac{a}{2} \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2}$$

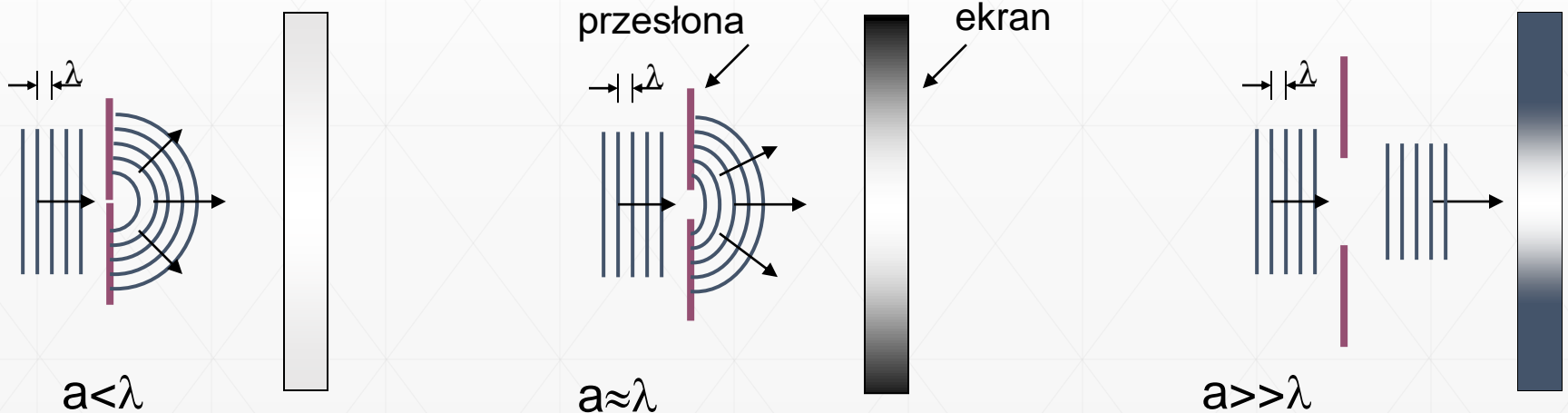
$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

lub gdy całkowita różnica faz  
 $\Phi = 2\pi$       $\Phi = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_1$

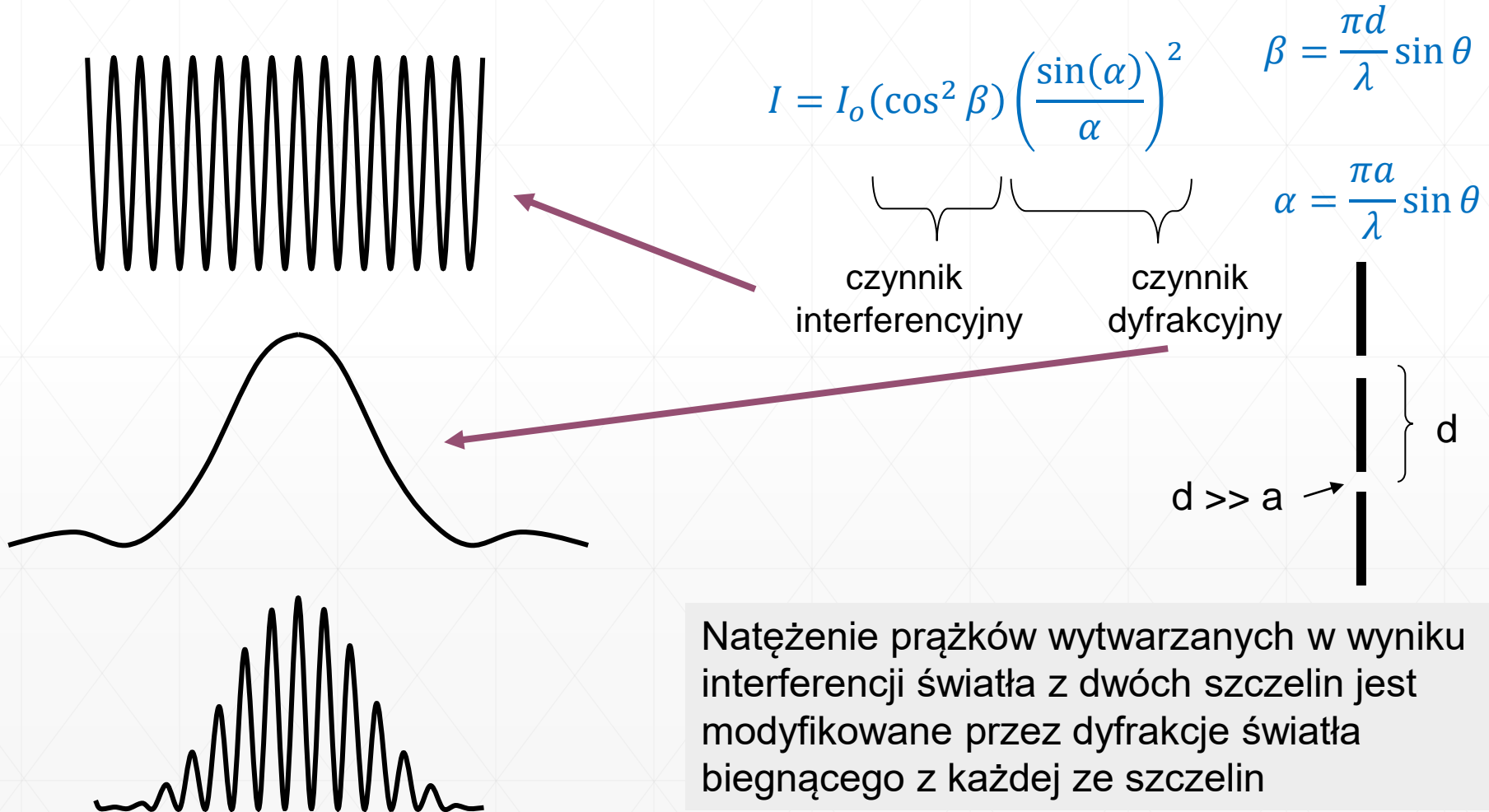


# Dyfrakcja, a szerokość szczeliny

- Jeżeli szerokość szczeliny staje się mała, to kąt przy którym pojawia się pierwsze minimum staje się równy  $90^\circ$ , a następne minimum w ogóle nie występuje
- Jeżeli szerokość szczeliny rośnie, to wzmocnienie występuje tylko dla kąta  $=0$  (jedno maksimum)
- Jeśli przeszkody mają duże rozmiary w porównaniu z długością fali, to promieniowanie rozchodzi się po liniach prostych i efekty falowe nie grają roli



# Dyfrakcja na dwóch szczelinach

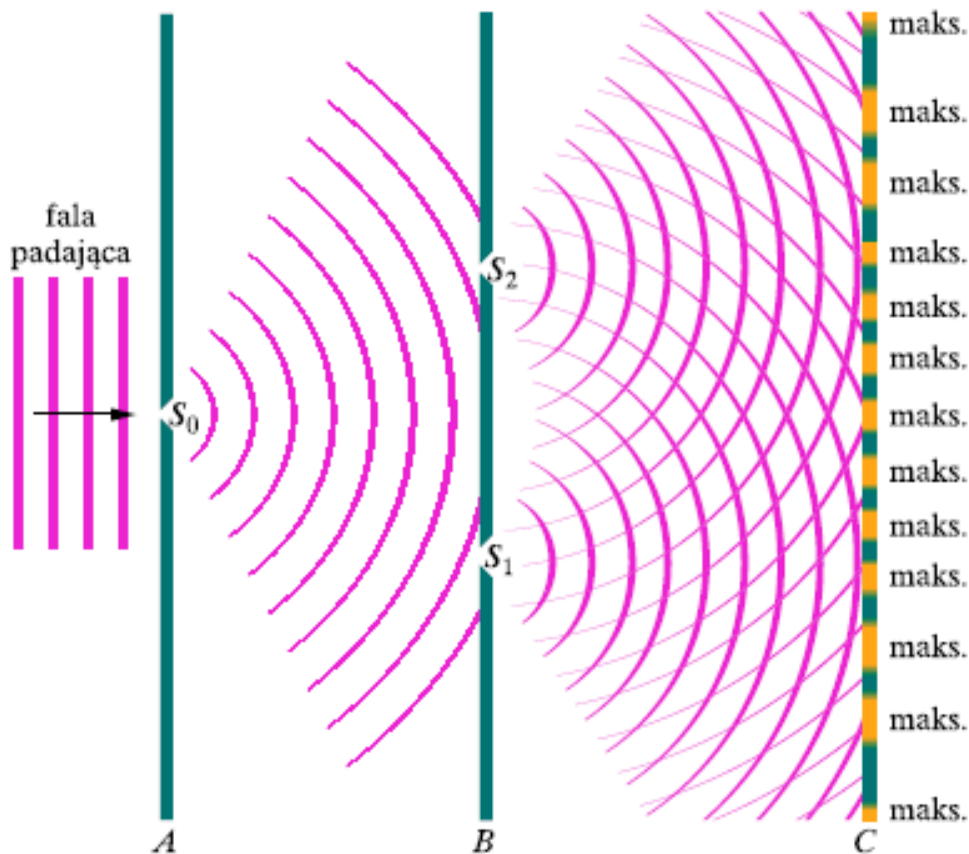


Natężenie prążków wytwarzanych w wyniku interferencji światła z dwóch szczelin jest modyfikowane przez dyfrakcje światła biegnącego z każdej ze szczelin



# Doświadczenie Younga

przykładem dyfrakcji na dwóch szczelinach jest doświadczenie Younga z 1801 r. - *pierwszy eksperyment wskazujący na falowy charakter światła.*

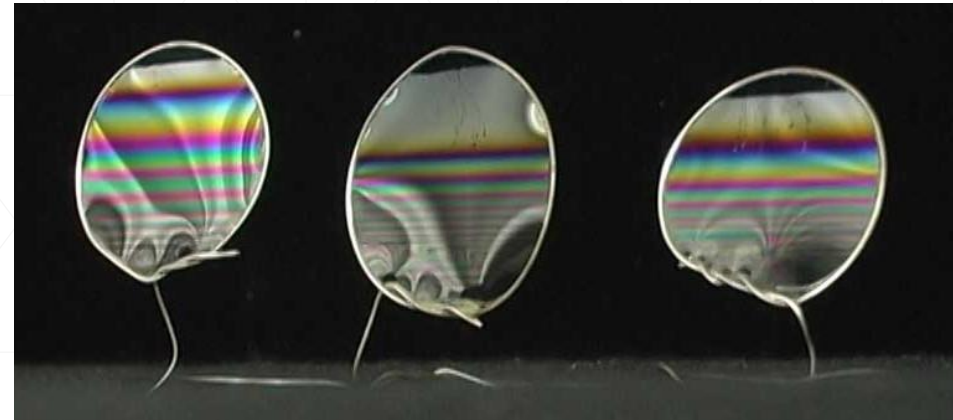
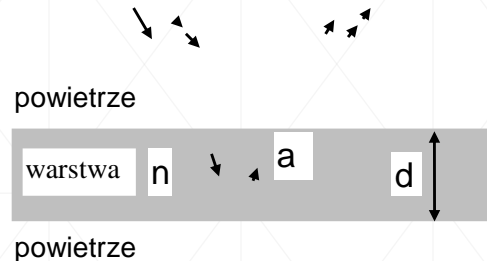


- płaska fala monochromatyczna ugina się na szczeliny  $S_0$
- światło dochodzące do ekranu B jest uginane na szczelinach  $S_1$  i  $S_2$ , które działają jak źródła punktowe
- promieniowanie ze źródeł  $S_1$  i  $S_2$  jest całkowicie spójne (różnica faz pozostaje stała w czasie), gdyż jest częścią jednej fali świetlnej ze źródła  $S_0$
- na ekranie C obserwujemy prążki interferencyjne
- półkoliste linie pomiędzy B i C obrazują fale, które rozchodziłyby się gdyby któraś ze szczelin była przysłonięta

# Przykład: Interferencja w cienkich warstwach

Źródło

obserwator



Dla dwóch promieni pokazanych na rysunku warunek na maksimum ma postać

$$2d = m\lambda_n + \lambda_n/2, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

Czynnik  $\lambda_n/2$  opisuje zmianę fazy przy odbiciu (od górnej powierzchni) bo zmiana fazy o  $180^\circ$  ( $\pi$ ) jest równoważna różnicy dróg równej połowie długości fali (różnica faz/ $2\pi$  = różnica dróg/ $\lambda$ ). Ponieważ długość fali w warstwie o współczynniku załamania  $n$  jest równa  $\lambda_n = \lambda/n$ , to otrzymujemy warunek:

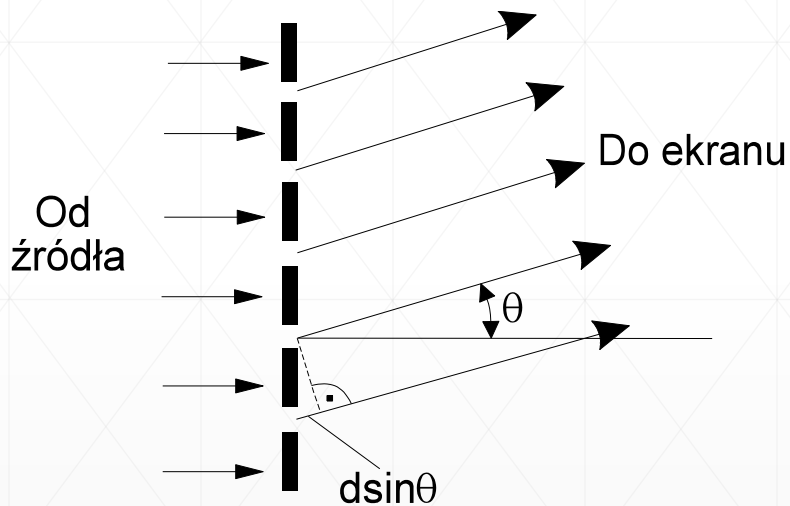
$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (maksima)}$$

Analogiczny warunek na minimum ma postać:

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

# Siatka dyfrakcyjna

zbiór równoległych jednakowych szczelin oddległych o  $d$  (stała siatki)



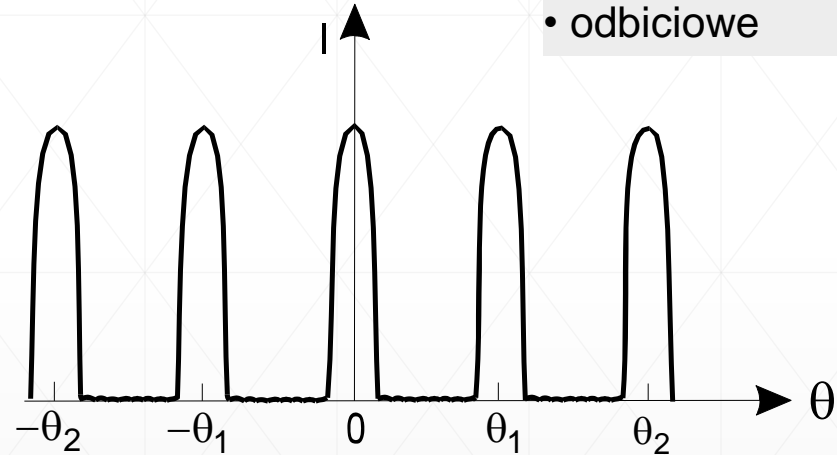
$$d \sin \theta = n \lambda$$

Natężenie  $I$  w maksimach jest  $N^2$  razy większe

$$I = N^2 I_0$$

siatki dyfrakcyjne:

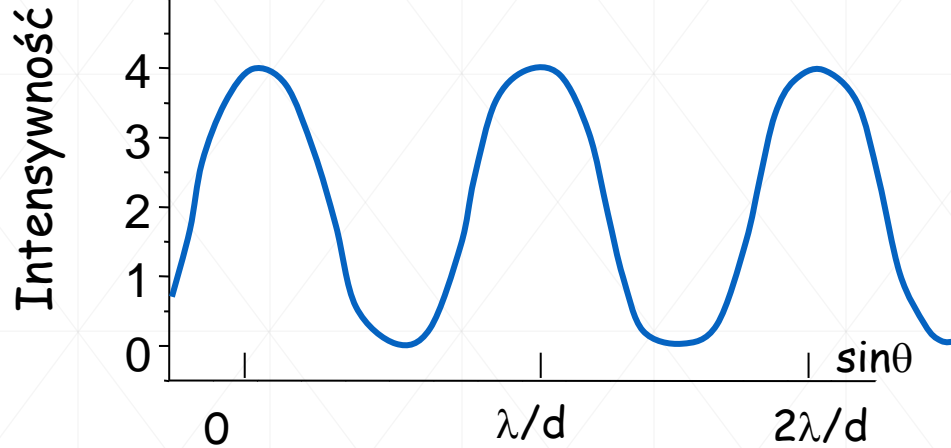
- transmisyjne
- odbiciowe



Siatki dyfrakcyjne wykorzystuje się do pomiarów długości fali oraz do badań struktury i natężenia linii widmowych

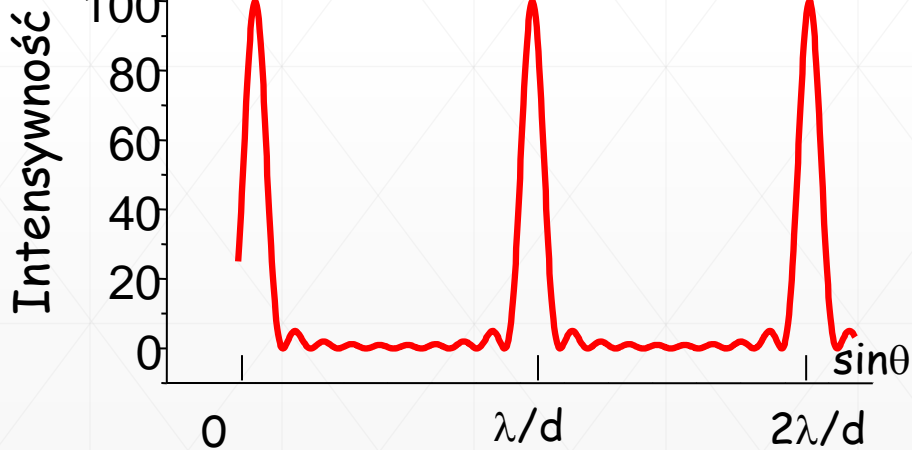
# Intensywność obrazu interferencyjnego

$d=2 \cdot 10^{-6} \text{m}$ ,  $N=2$ ,  $\lambda = 5893 \text{Å}$

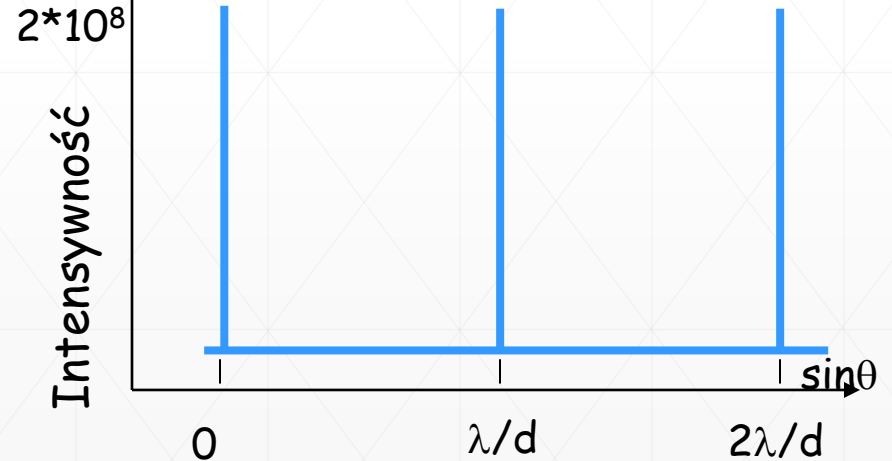


← dwie szczeliny  
siatka dyfrakcyjna

$d=2 \cdot 10^{-6} \text{m}$ ,  $N=10$ ,  $\lambda = 5893 \text{Å}$



$d=2 \cdot 10^{-6} \text{m}$ ,  $N=13400$ ,  $\lambda = 5893 \text{Å}$



w wyniku interferencji fal z wielu źródeł na ekranie uzyskuje się wzmocnienia natężenia fal w pozycjach dla których  $d \sin(\theta) = n\lambda$ . Czym więcej źródeł, tym maksima węższe, a natężenie większe.

# Rozdzielczość obrazów dyfrakcyjnych

położenie pierwszego minimum  
dla długiej wąskiej szczeliny  $a$

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

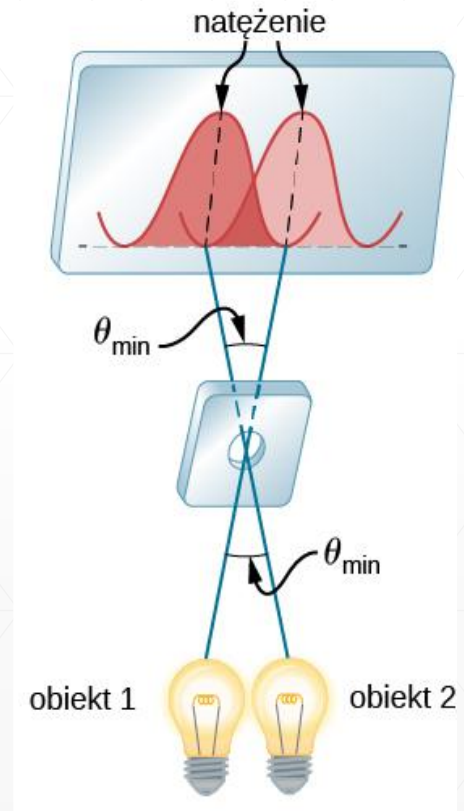
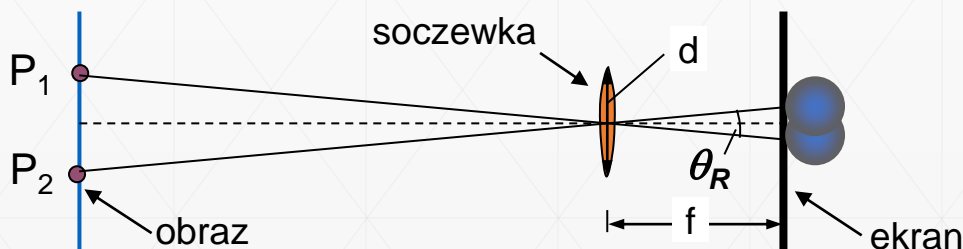
położenie pierwszego minimum  
dla otworu kołowego o średnicy  $d$   
(kątowy rozmiar obrazu)

$$\sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

kryterium rozdzielczości Rayleigha:  
obrazy rozróżnialne gdy centralne  
maks. jednego przypadku w miejscu  
pierwszego minimum drugiego

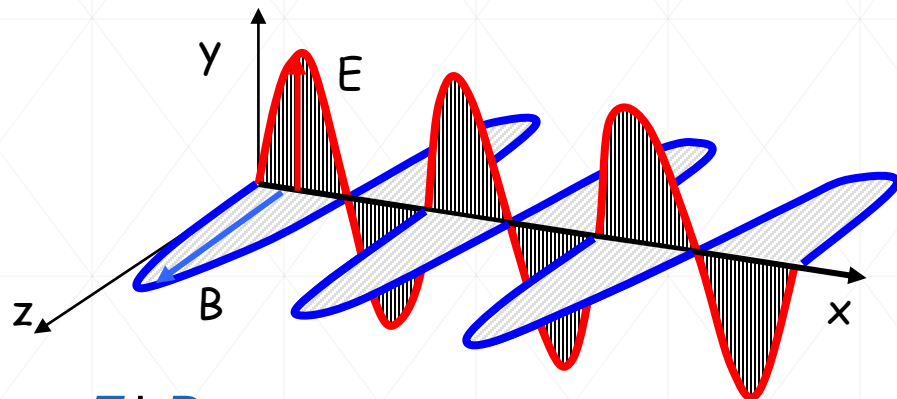
$$\theta_R = \arcsin \left( 1,22 \frac{\lambda}{d} \right)$$
$$\approx 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

obserwacja gwiazd, obrazów  
rolę otworu spełnia soczewka skupiająca



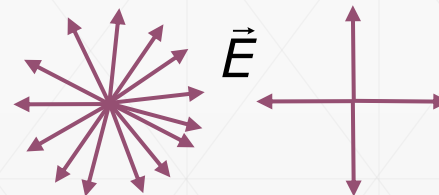
[„Fizyka dla szkół wyższych –  
tom 3”, [www.openstax.pl](http://www.openstax.pl)]

# Polaryzacja światła



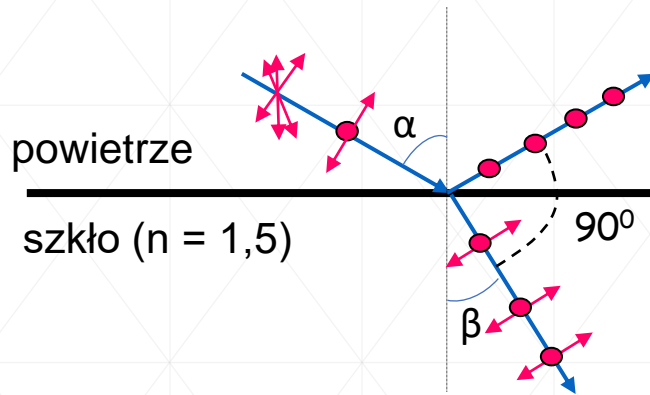
- Fala EM jest spolaryzowana gdy wektory  $E$  i  $B$  mają ustalony kierunek w przestrzeni
  - polaryzacja liniowa –  $E$  drga w jednym kierunku
  - polaryzacja kołowa –  $E$  zatacza koła
- Polaryzacja jest zjawiskiem, które występuje tylko dla fal poprzecznych
- Kierunek polaryzacji to kierunek drgań wektora  $E$
- Światło wysyłane przez wiele źródeł – atomów jest niespolaryzowane – składa się z wielu różnych kierunków polaryzacji

światło niespolaryzowane jest superpozycją dwóch fal spolaryzowanych wzajemnie prostopadle



# Sposoby polaryzacji 1

## POLARYZACJA PRZEZ ODBICIE



fala spolaryzowana  
prostopadle do  
płaszczyzny padania  
(płaszczyzny rysunku)

fala spolaryzowana  
w płaszczyźnie  
padania

Niespolaryzowaną falę padającą **E** można rozłożyć na dwie składowe:

- prostopadłą do płaszczyzny padania, ●
- leżąca w płaszczyźnie padania. <img alt="red arrow" data-bbox="508 558 541 581"/>



Jeśli  $\alpha + \beta = 90$ , to fala odbita jest całkowicie spolaryzowana.  
Składowa leżąca w płaszczyźnie padania nie może rozchodzić się  
w tym kierunku bo byłaby wówczas to fala podłużna

Kąt Brewstera

Jeśli  $\alpha + \beta = 90$ , to  $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90 - \alpha)}$



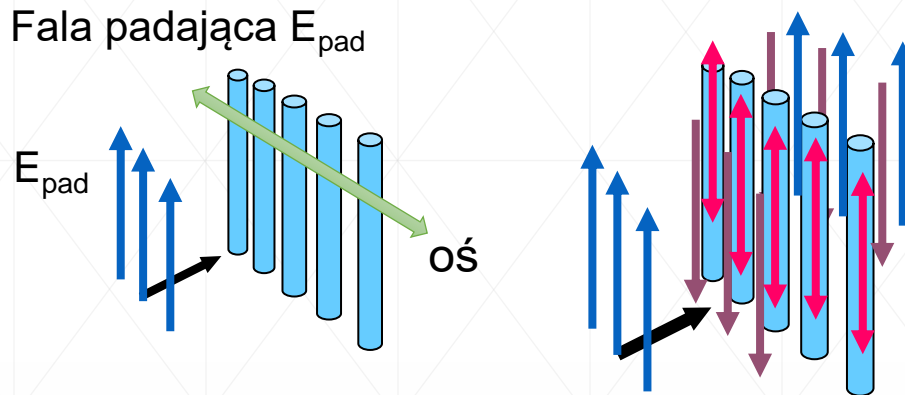
$$n = \operatorname{tg} \alpha$$

# Sposoby polaryzacji 2

## ZA POMOCĄ POLARYZATORÓW

polaryzator: metalowe pręty (mikrofale, fale radiowe)  
długie cząsteczki (światło)

oś polaryzatora – linia  
prostopadła do prętów



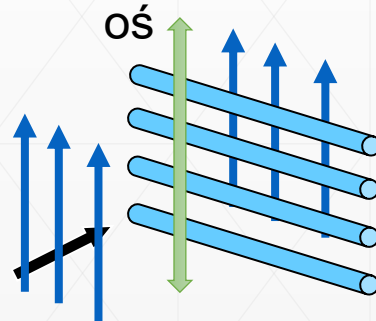
Fala  
przepuszczona

$$E = E_{\text{pad}} + E_{\text{pręty}} = 0$$

Fala  
wytworzona  
przez prąd

$$E_{\text{pręty}} = - E_{\text{pad}}$$

Fala spolaryzowana prostopadłe do osi  
polaryzatora jest pochłaniana



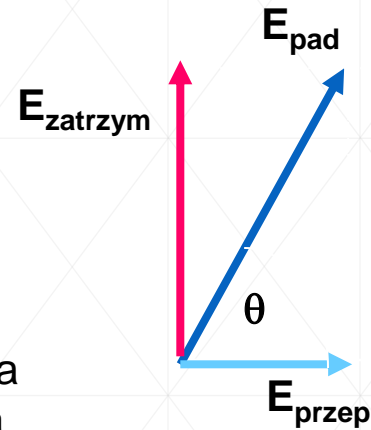
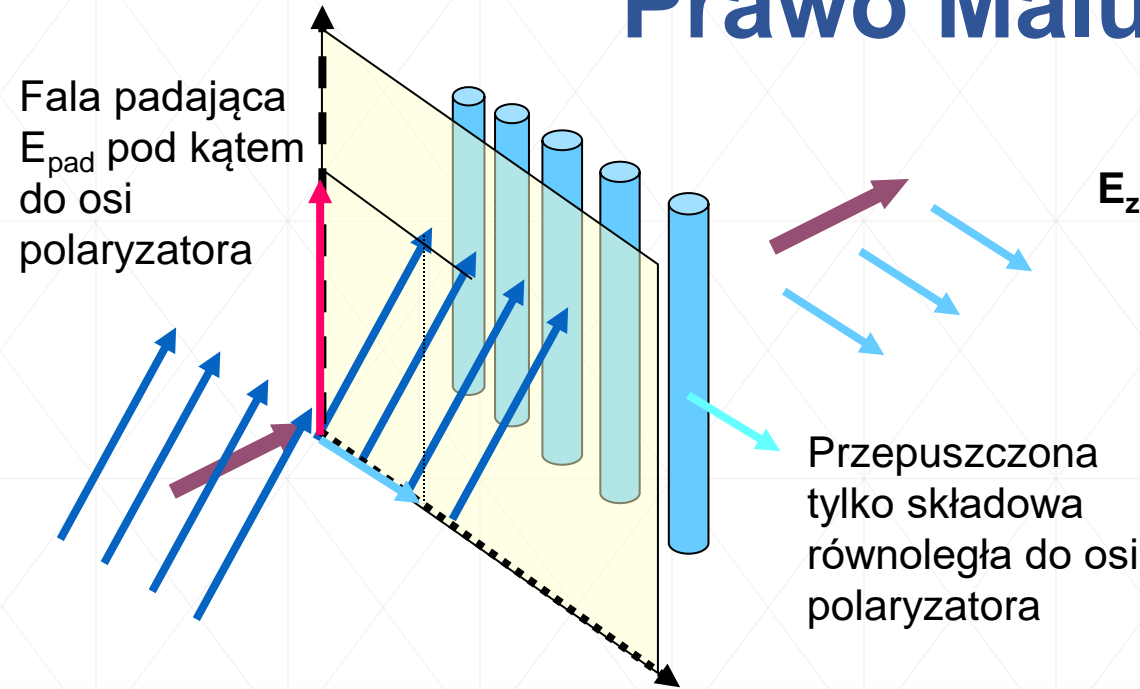
Fala  
przepuszczona  
= fala padająca

Fala spolaryzowana równolegle do osi  
polaryzatora jest przepuszczana

Wygaszenie lub  
przepuszczenie fali jest  
wynikiem interferencji fali  
padającej i wytworzonej  
w materiale polaryzatora

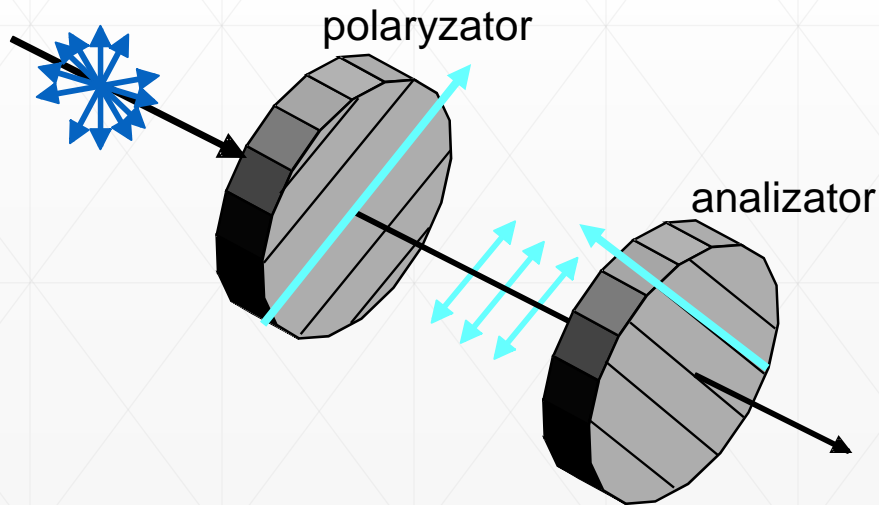


# Prawo Malusa



$$I = I_m \cos^2 \theta$$

$$E_{\text{przep}} = E_{\text{pad}} \cos \theta$$

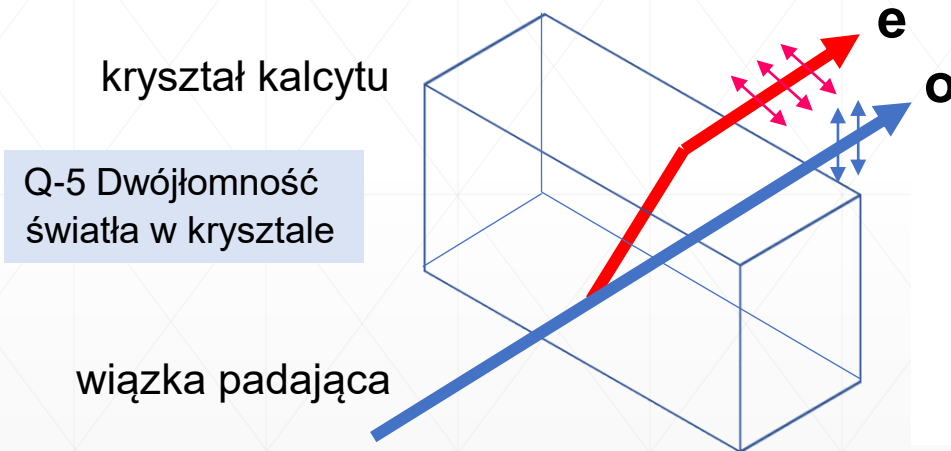


**Prawo Malusa** – natężenie światła spolaryzowanego po przejściu przez analizator optyczny jest proporcjonalne do kwadratu cosinusa kąta pomiędzy płaszczyznami polaryzacji światła przed i po przejściu przez analizator (reguła kwadratu cosinusa)

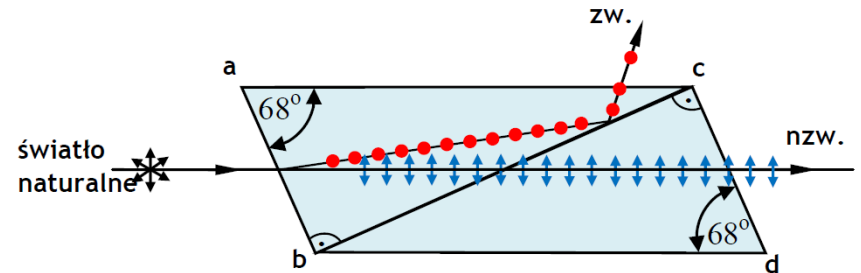
# Sposoby polaryzacji 3

## WYKORZYSTUJĄC ZJAWISKO PODWÓJNEGO ZAŁAMANIA ŚWIATŁA (DWÓJŁOMNOŚĆ)

- Jeśli współczynnik załamania, nie zależy od kierunku rozchodzenia się światła w ośrodku ani od jego polaryzacji to takie ciała nazywamy ciałami optycznie **izotropowymi**
- Gdy warunki te nie są zachowane to takie ciała nazywamy **anizotropowymi**. W takim przypadku pojedyncza wiązka światła rozszczepia się na powierzchni kryształu na dwie wiązki: **promień zwyczajny o** i **nadzwyczajny e**



Pryzmat Nicola wykorzystujący zjawisko wewnętrznego odbicia



- Obie wiązki są spolaryzowane liniowo, przy czym ich płaszczyzny drgań są wzajemnie *prostopadłe*.
- **Promień zwyczajny o** spełnia prawo załamania (ma ten sam współczynnik załamania  $n_o$  niezależnie od kierunku propagacji), a **promień nadzwyczajny e** nie spełnia tego prawa ( $n_e$  - zmienia się zależnie od kierunku propagacji).

# Sposoby polaryzacji 3

WYKORZYSTUJĄC ZJAWISKO PODWÓJNEGO ZAŁAMANIA ŚWIATŁA (DWÓJŁOMNOŚĆ)



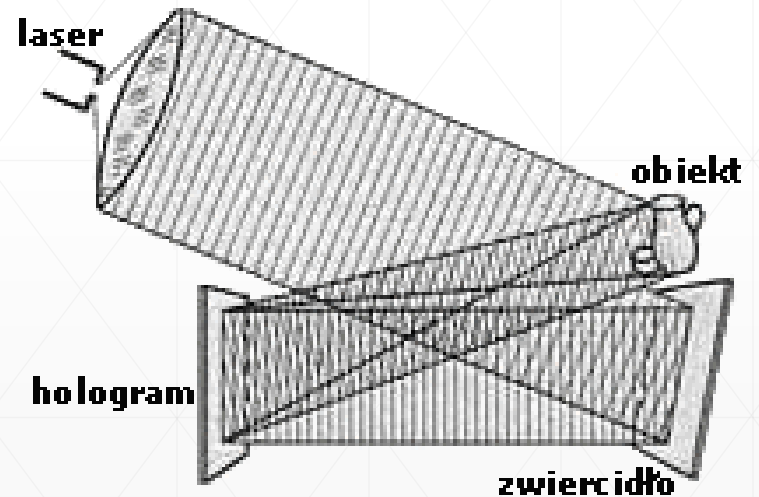
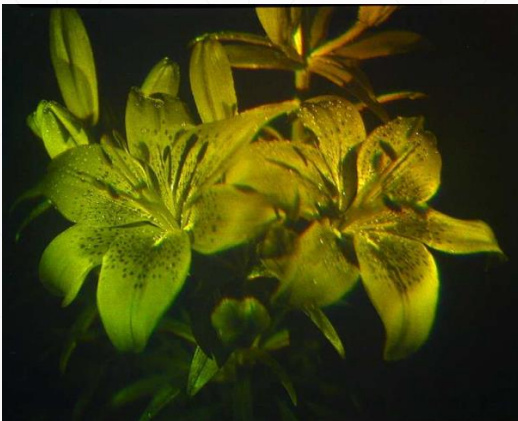
- Obie wiązki są spolaryzowane liniowo, przy czym ich płaszczyzny drgań są wzajemnie *prostopadłe*.
- *Promień zwyczajny*  $o$  spełnia prawo załamania (ma ten sam współczynnik załamania  $n_o$  niezależnie od kierunku propagacji), a *promień nadzwyczajny*  $e$  nie spełnia tego prawa ( $n_e$  - zmienia się zależnie od kierunku propagacji).

# Holografia

Nazwa hologramu pochodzi od greckich słów hōlos i grápho, które po polsku oznaczają: „cały rysunek” – hologram przedstawia obraz trójwymiarowy, zwykła fotografia jest dwuwymiarowa.

**Zapis** polega na fotograficznym zarejestrowaniu obrazu interferencyjnego wytworzonego przez dwie fale spójne: jedną z lasera po ewentualnym odbiciu od zwierciadła (**fala odniesienia**), i drugą pochodzącą od oświetlonego również laserem przedmiotu (**fala przedmiotowa**)

Uzyskany po wywołaniu hologram zawiera zakodowaną postać szeregu prążków i pierścieni interferencyjnych informację o amplitudzie i fazie fali pochodzącej od przedmiotu, czyli informację o wyglądzie holografowanego przedmiotu z uwzględnieniem stosunków przestrzennych.



**Odtwarzanie** hologramu polega na oświetleniu hologramu, nie konieczne światłem spójnym. W wyniku dyfrakcji fali odtwarzającej na hologramie, powstają fale ugięte, które tworzą dwa obrazy przestrzenne: jeden rzeczywisty, drugi pozorny.

# Zastosowania holografii:

- w mikroskopii holograficznej – możliwość wyeliminowania aberracji układu optycznego;
- w badaniu przemieszczeń i deformacji przedmiotów, analizie ich drgań;
- badać rozkłady temperatury lub przepływy hydrodynamiczne;
- w diagnostyce medycznej do badania wnętrza oka, wykrywania nowotworów;
- hologram tęczową stosuje się do zabezpieczania kart kredytowych lub tworzenia trójwymiarowych ilustracji.

Hologram



# Podsumowanie

- Interferencja – świadectwo falowego charakteru zjawiska
- Warunek na wzmocnienie interferencyjne dla dwóch źródeł odległych o  $d$  wysyłających spójne promieniowanie o dł.  $\lambda$   
$$d \sin \theta = n\lambda$$
- Ugięcie światła – zmiana kierunku rozchodzenia się światła w pobliżu nieprzezroczystej przesłony (dyfrakcja światła)
- Siatki dyfrakcyjne – przykłady obrazów interferencyjnych, zastosowanie do wyznaczania odległości lub długości fali
- Polaryzacja światła – na czym polega i sposoby otrzymywania
- Hologram – zapisany obraz interferencyjny



**Dziękuję za uwagę**