



Proszę o uwagę

24. Optyka falowa

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

20. Sformułuj zasadę Huygensa i podaj jej praktyczne zastosowanie.
21. Co to jest interferencja fal i kiedy zachodzi - określ warunki na uzyskanie „jasnego” i „ciemnego” prążka interferencyjnego.
22. Co to jest spójność fal i jakie ma praktyczne zastosowanie.
23. Czym jest dyfrakcja fal i kiedy jej wynik jest najbardziej widoczny.
24. Różnica pomiędzy obrazem interferencyjnym a dyfrakcyjnym oraz wpływ dyfrakcji na rozdzielczość uzyskiwanych obrazów.
25. Co to jest polaryzacja fal świetlnych i dla jakiego typu fal można o niej mówić.
26. Wymień i omów sposoby polaryzowania wiązki świetlnej.
27. Co to jest dwójłomność optyczna.
28. Co wiesz o holografii – czym różni się od fotografii.



Światło jako fala elektromagnetyczna

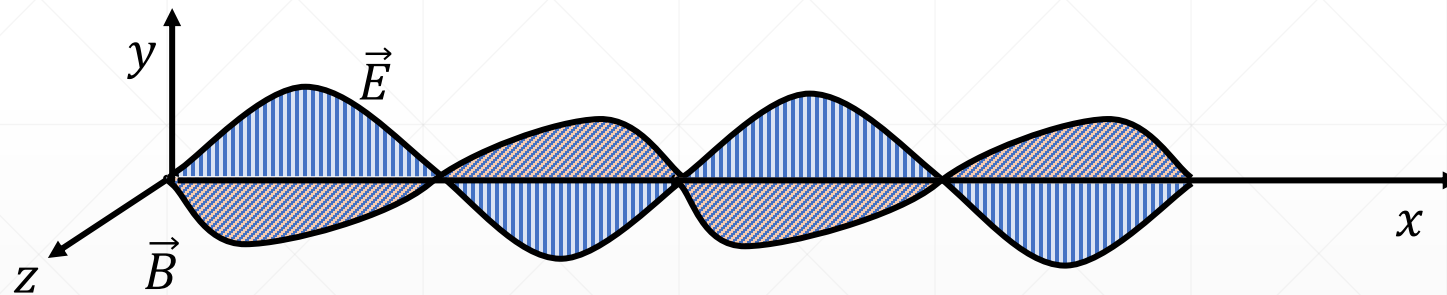
- Z równań Maxwella wynika, że wokół płaszczyzny przez którą płynie zmienny w czasie prąd powstają pola elektryczne i magnetyczne, spełniające równanie falowe,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

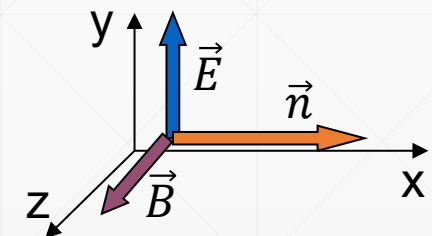
$$E_y(x, t) = E_0 \cos \omega (t - x/c)$$

$$B_z(x, t) = B_0 \cos \omega (t - x/c)$$

tzn. pola elektryczne i magnetyczne 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 ich rozchodzenia się w przestrzeni (kierunku propagacji fali), tzn. $B_z \perp E_y \perp \vec{n}$



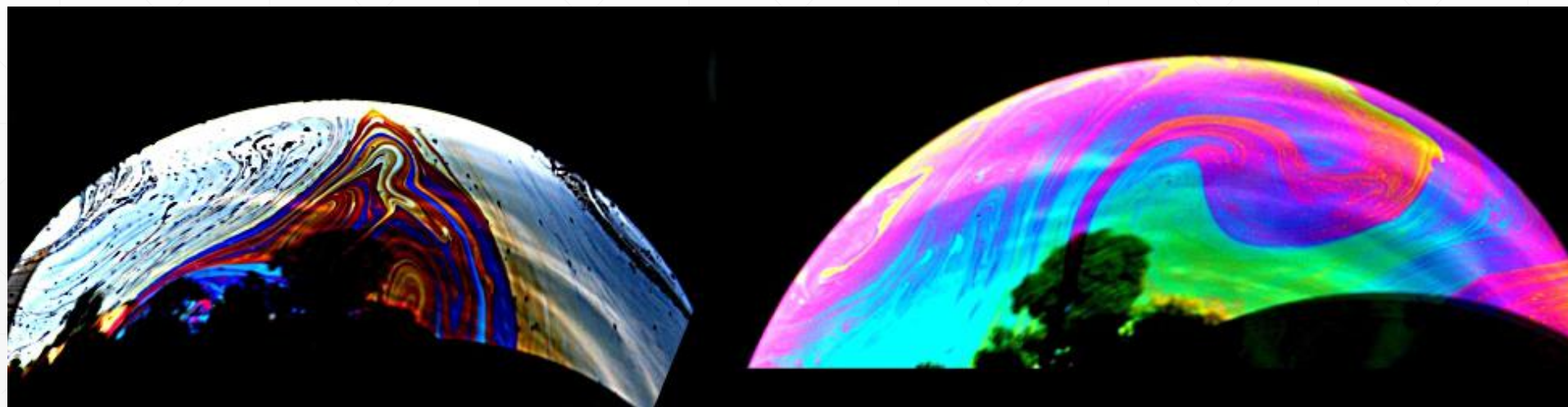
- prędkość fazowa fali równa jest prędkości światła $v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

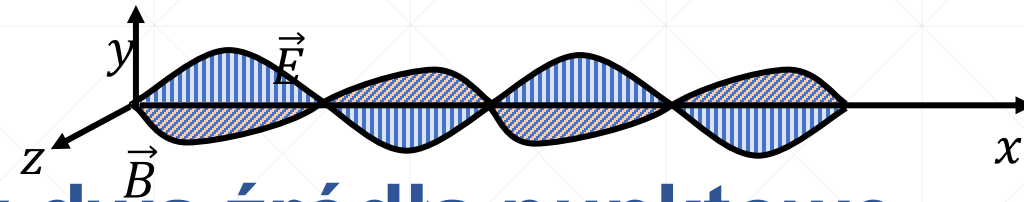
INTERFERENCJA ŚWIATŁA



Zjawisko interferencji światła (nakładania 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]



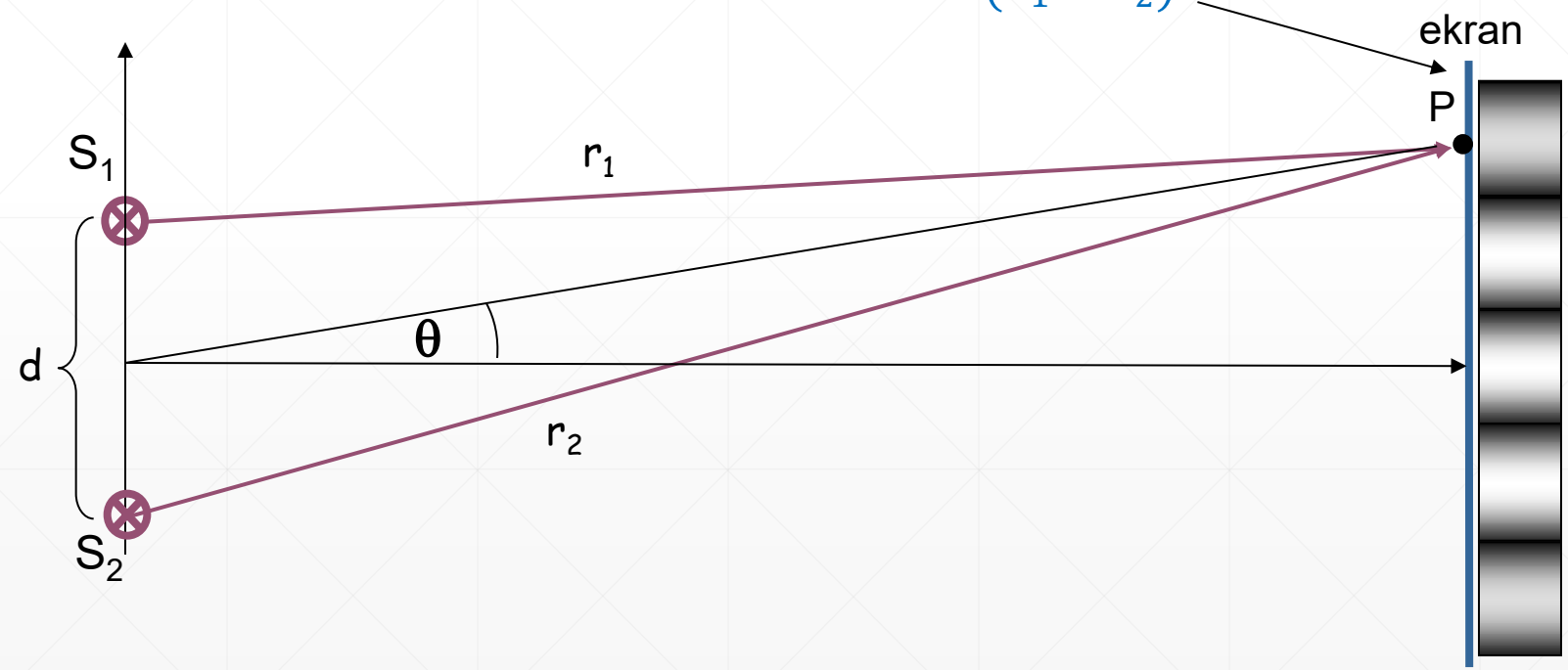


Interferencja fal wysyłanych przez dwa źródła punktowe

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

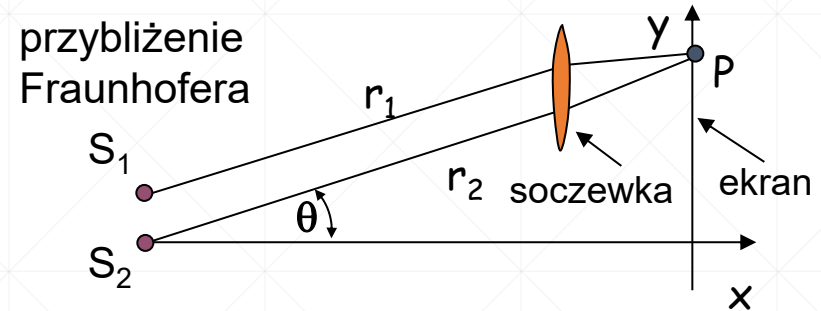
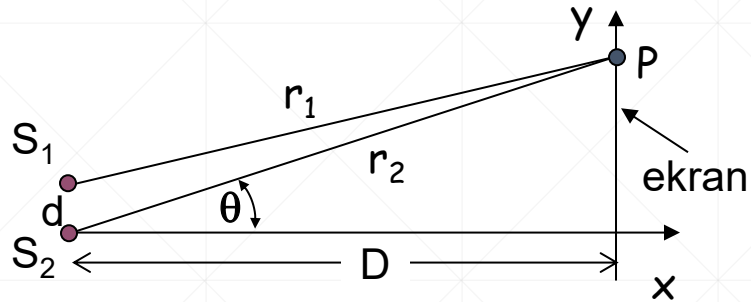
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$I \sim (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2$$



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

Interferencja fal - suma amplitud



Do P, w zależności od kąta θ 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

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

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

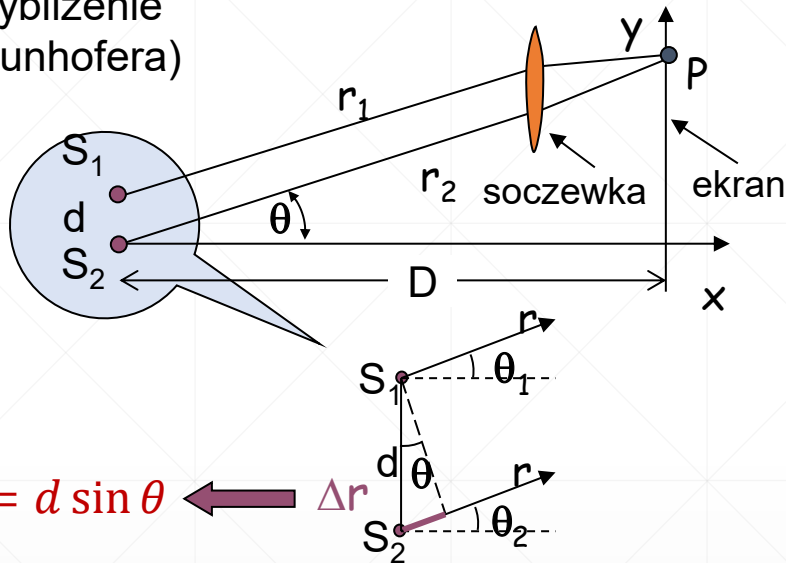
A – amplituda fali wypadkowej

$|A| = \text{max}$ gdy $\frac{\phi}{2} = n\pi$ 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

ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

ABSTRACT.

The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of rigorous solutions for undulatory gravitational fields, we investigate rigorously the case of cylindrical gravitational waves. It turns out that rigorous solutions exist and that the problem reduces to the usual cylindrical waves in euclidean space.

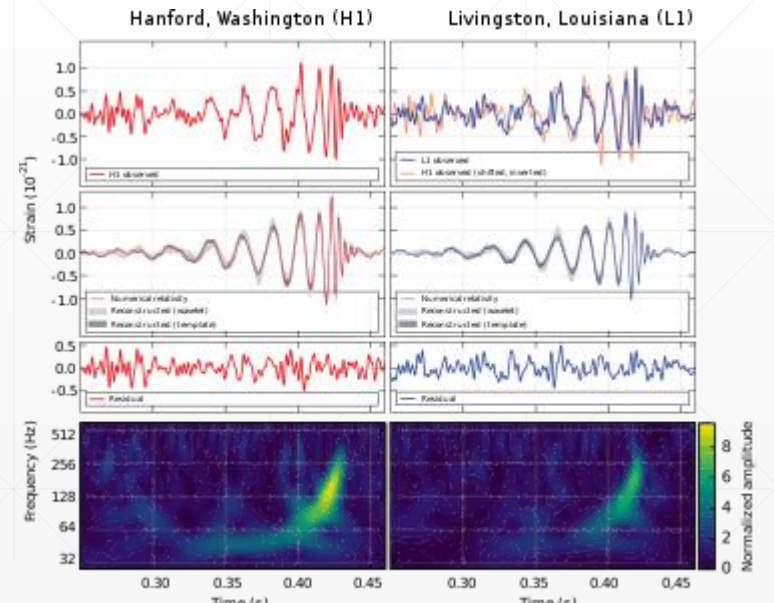
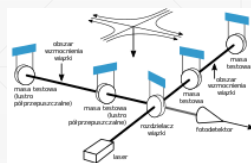
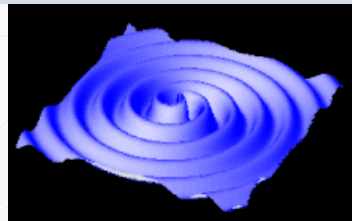
I. APPROXIMATE SOLUTION OF THE PROBLEM OF PLANE WAVES AND THE PRODUCTION OF GRAVITATIONAL WAVES.

It is well known that the approximate method of integration of the gravitational equations of the general relativity theory leads to the existence of gravitational waves. The method used is as follows: We start with the equations

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = -T_{\alpha\beta} \quad (1)$$

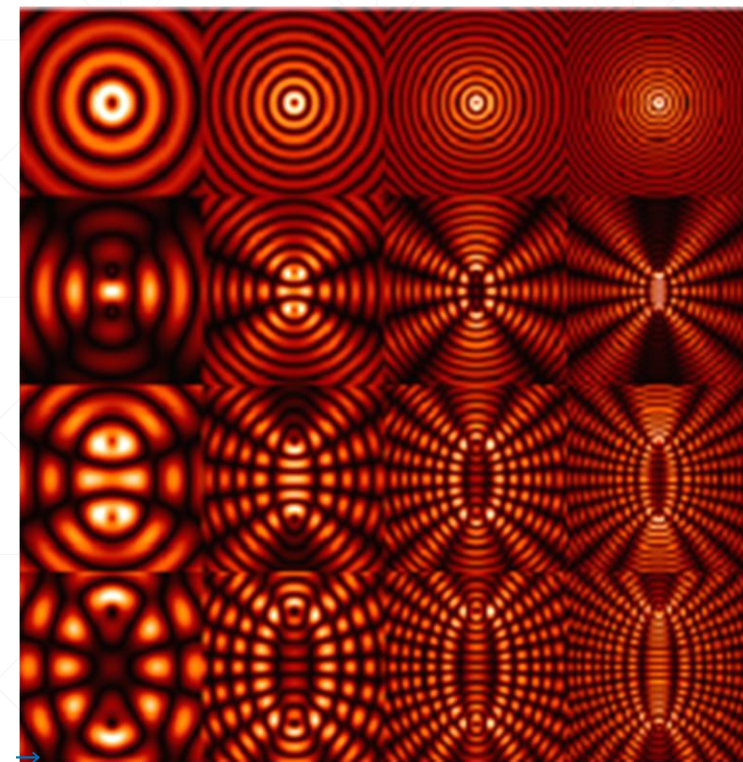
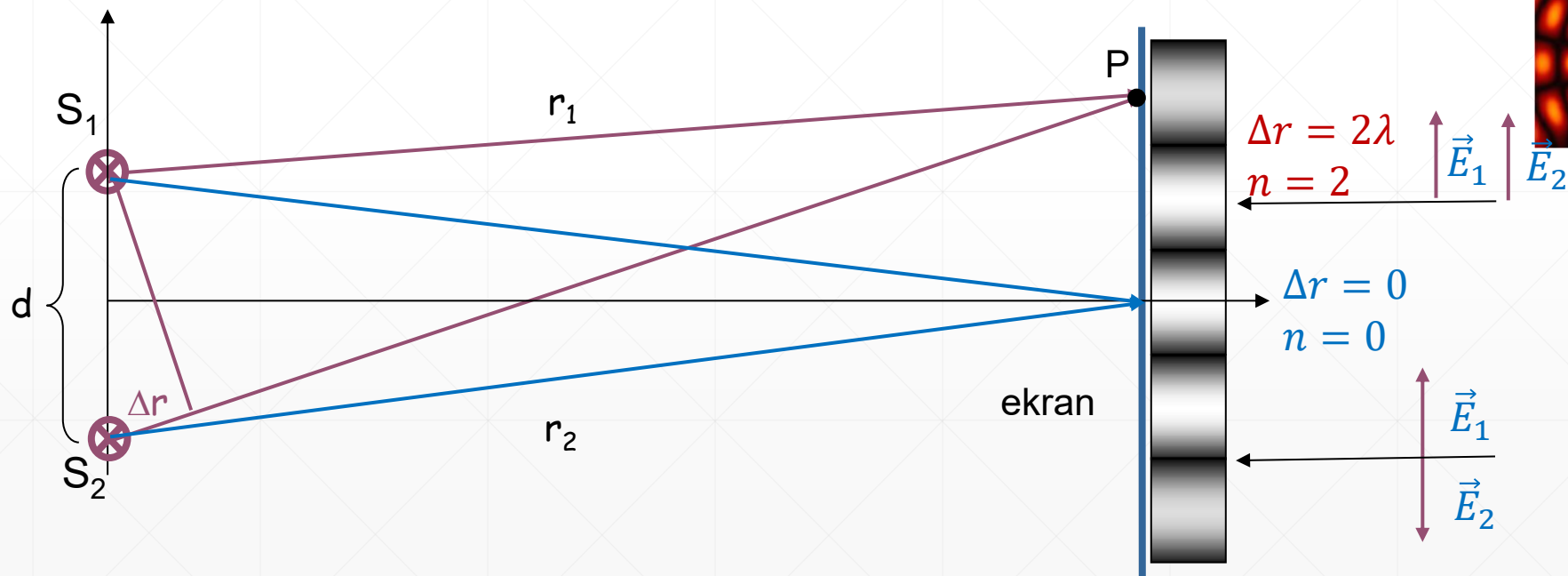
We consider that the $g_{\alpha\beta}$ are replaced by the expressions

$$g_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + \gamma_{\alpha\beta} \quad (2)$$



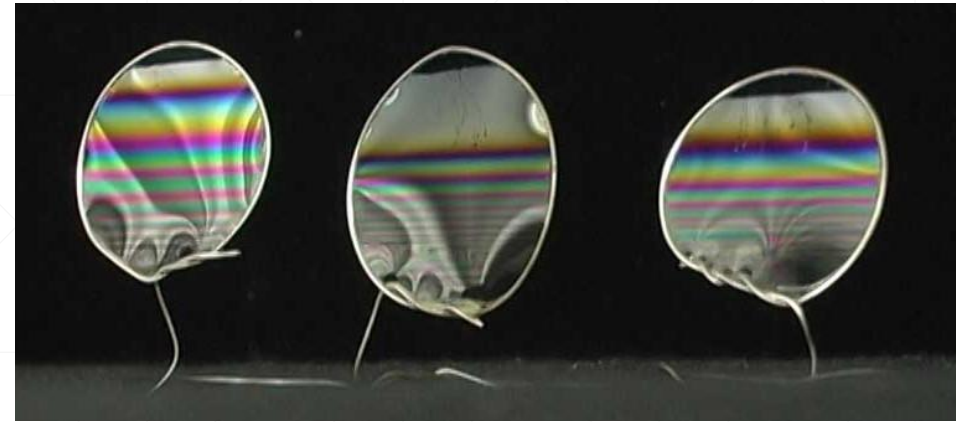
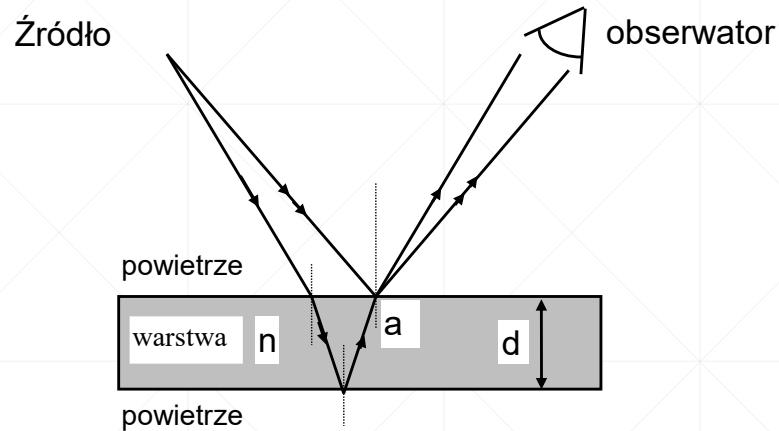
Interferencja fal

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



Gdy fazy źródeł S_1 i S_2 są zgodne to jasny prążek (np. na środku), gdy przeciwne to ciemny.

Przykład: Interferencja w cienkich warstwach



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° (π) jest równoważna różnicy dróg równej połowie długości fali (różnica faz/ 2π = różnica dróg/ λ).

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:

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

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 obserwacji.

źródło światła spójnego: [laser](#)

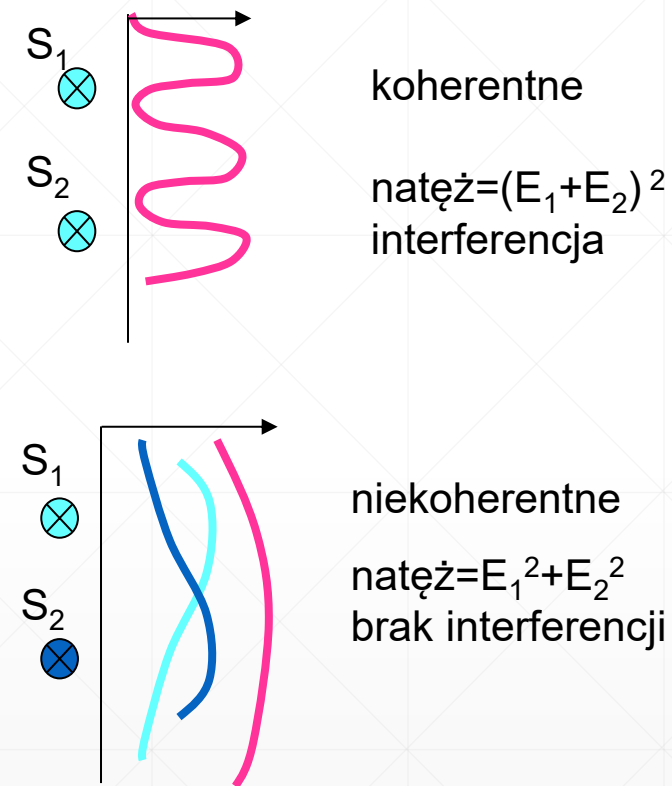
niekoherentne źródła fal (np. żarówki, słońce)

brak prążków interferencyjnych

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

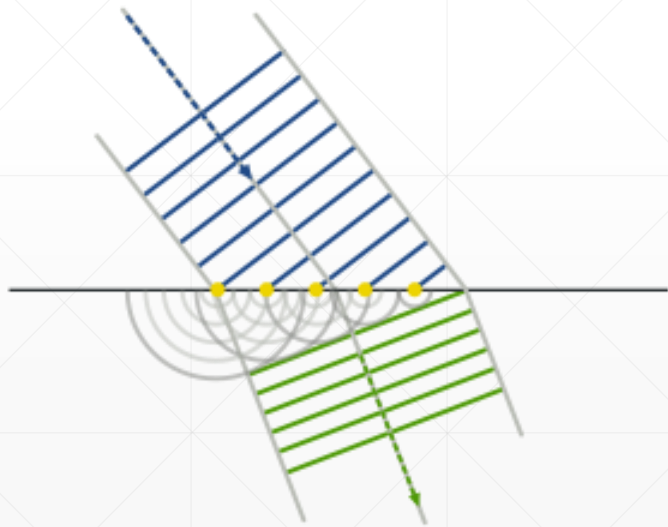
fale spójne:
natężenie = $(E_1 + E_2)^2$
zdolność do interferencji

fale niespójne:
natężenie = natężenie1 + natężenie2 = $E_1^2 + E_2^2$
brak zdolności do interferencji

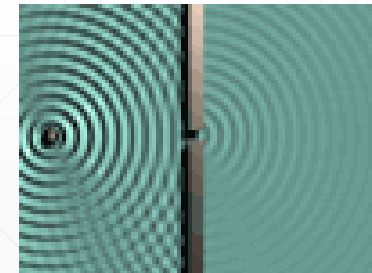
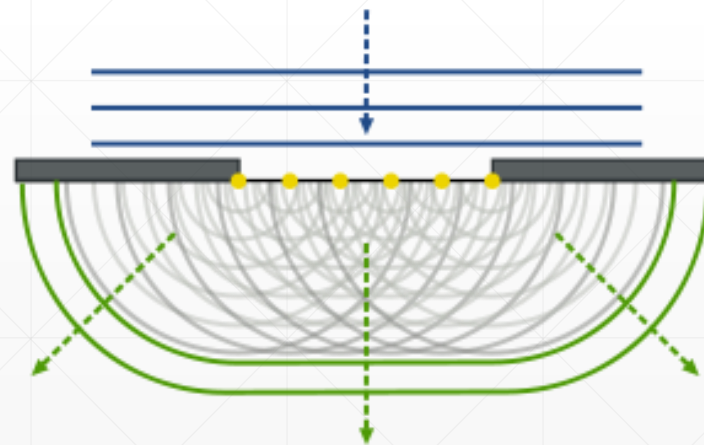
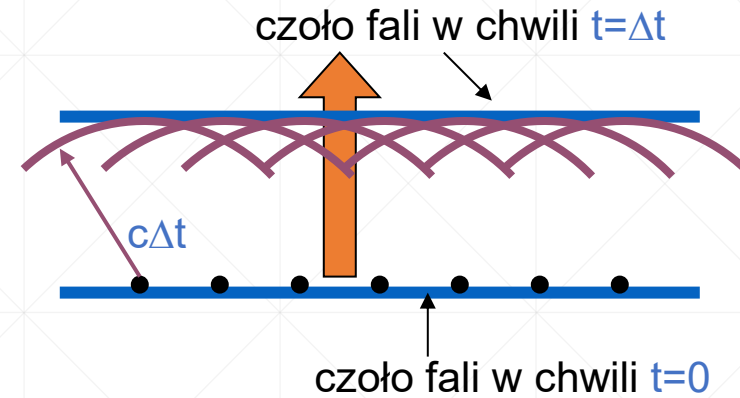


Zasada Huygensa - ugięcie światła

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.

Dyfrakcja światła

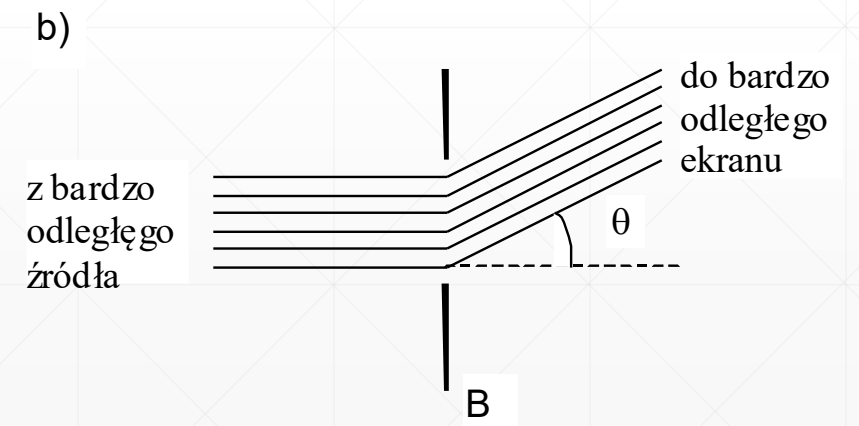
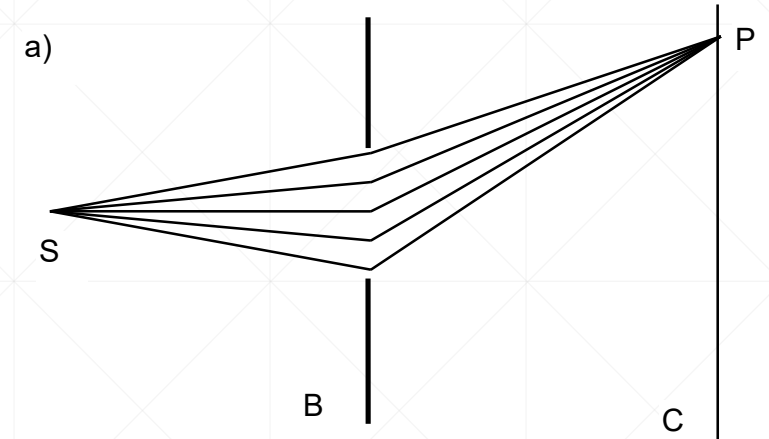
- ugięcie, czyli odchylenie od prostoliniowości rozchodzenia się światła w pobliżu ciał nieprzezroczystych nazywamy **dyfrakcją światła**
- zjawisko to jest tym wyraźniejsze, im rozmiary przeszkody (np. szer. szczeliny) są bardziej zbliżone do długości fali
- w wyniku dyfrakcji powstaje obraz prążków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



Rodzaje dyfrakcji

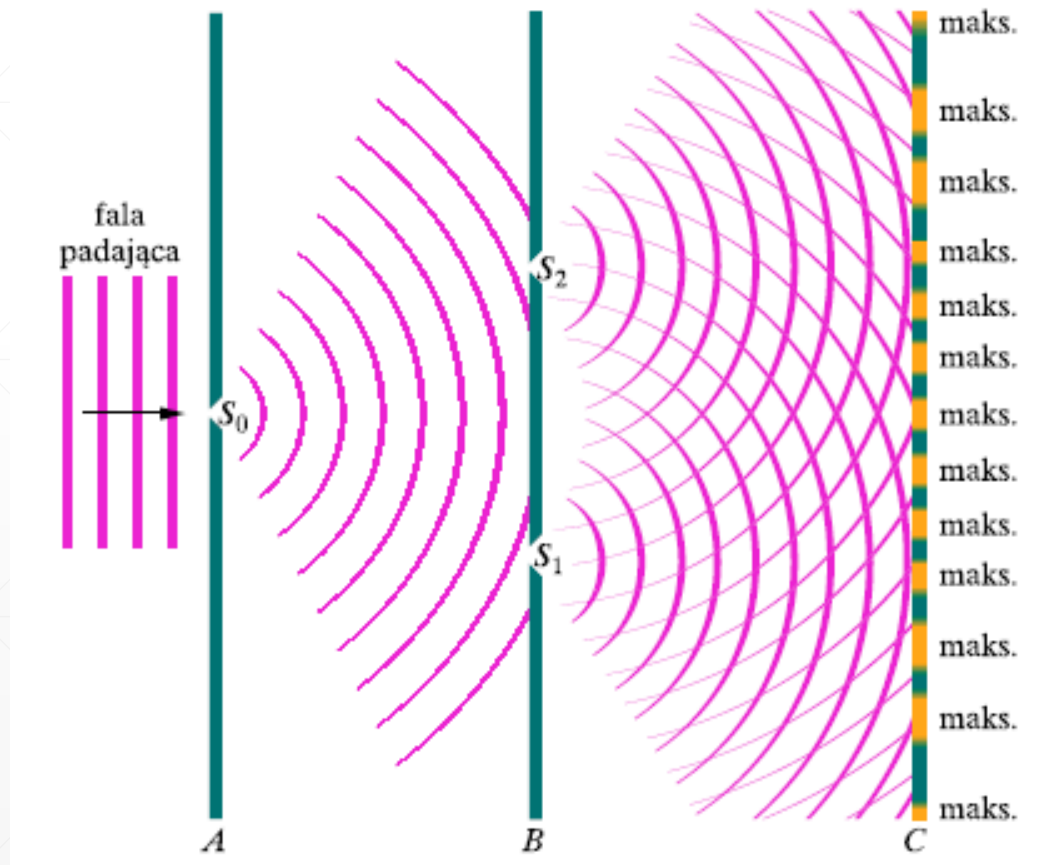
Dyfrakcja Fresnela - fale opuszczające otwór nie są płaskie (promienie nie są równoległe) zachodzi to gdy źródło fal S i ekran C znajdują się w skończonej (bliskiej) odległości od ekranu za szczeliną B .

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



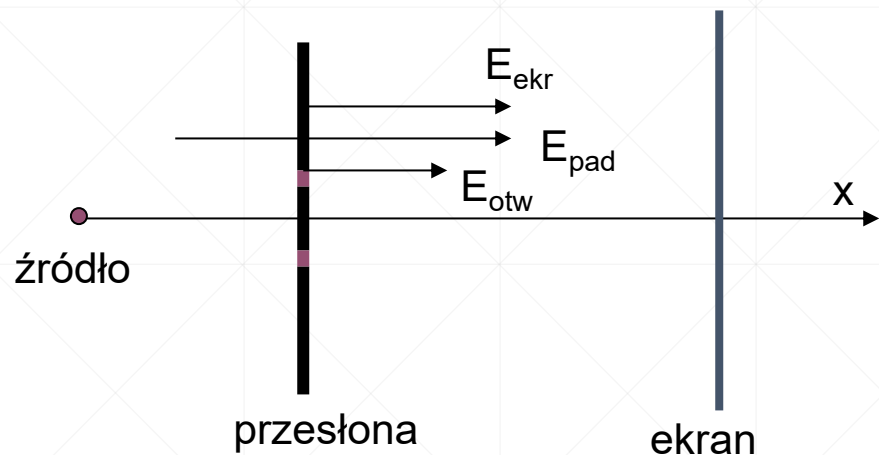
Doświadczenie Younga

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



- płaska fala monochromatyczna ugina się na szczelinie 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

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

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

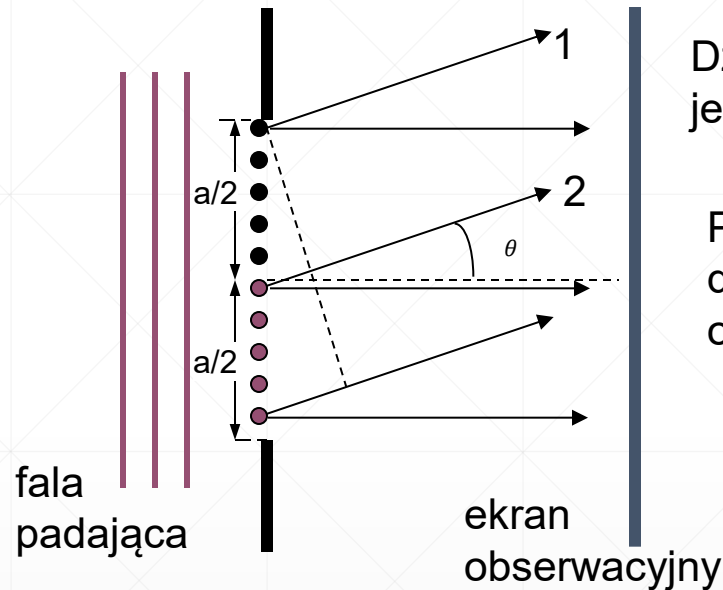
po zasłonięciu otworów dodatkowymi ekranami

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

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

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

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



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

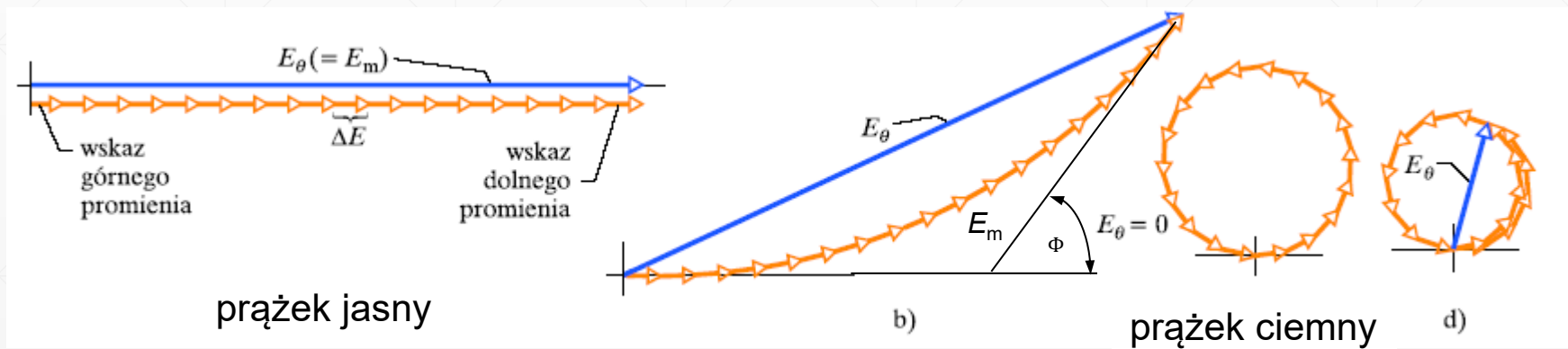
Pierwszy prążek ciemny, gdy różnica dróg promieni 1,2 od górnych stref obu obszarów równa jest $\lambda/2$

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

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

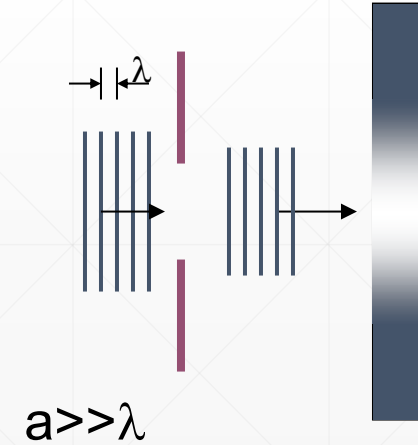
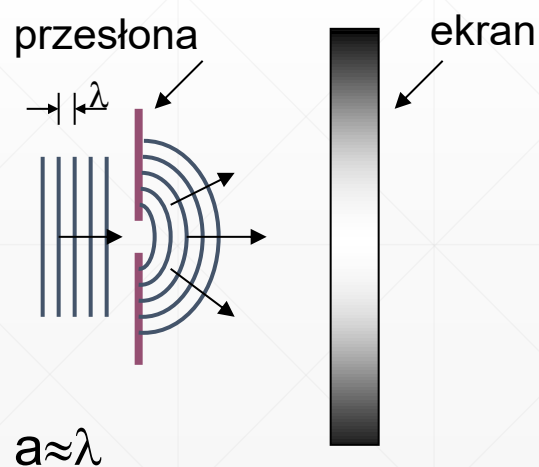
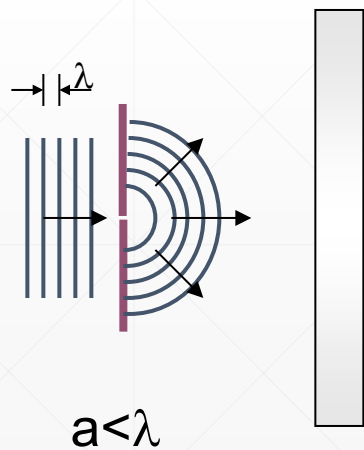
lub gdy całkowita różnica faz

$$\Phi = 2\pi \quad \Phi = k\Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_1$$

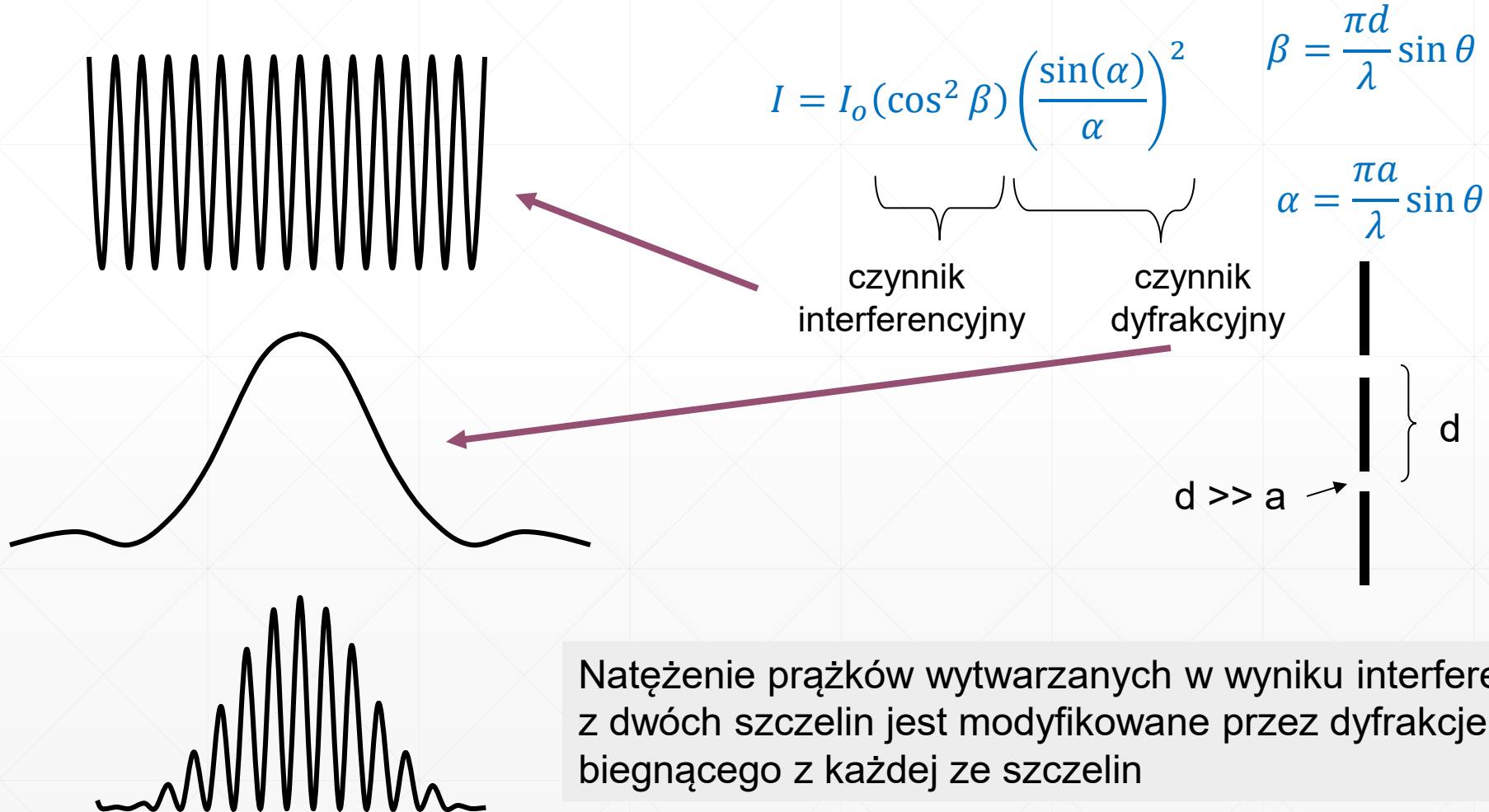


Dyfrakcja, a szerokość szczeliny

- Jeżeli szerokość szczeliny staje się mała, to kąt przy którym pojawia się pierwsze minimum staje się równy 90° , 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



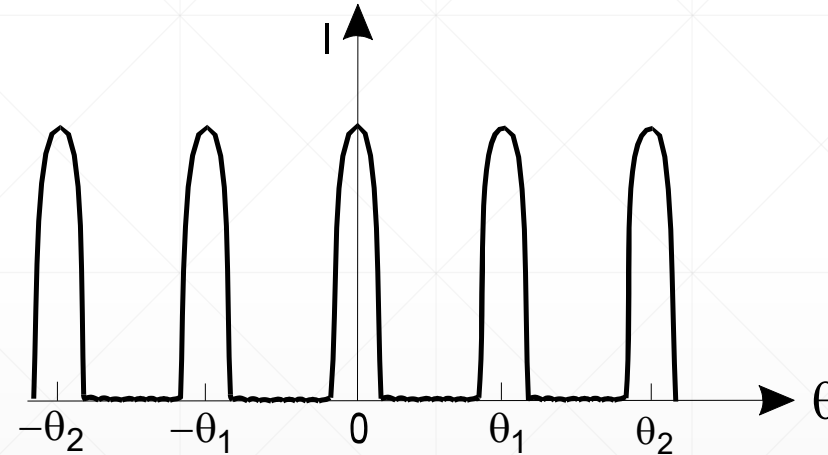
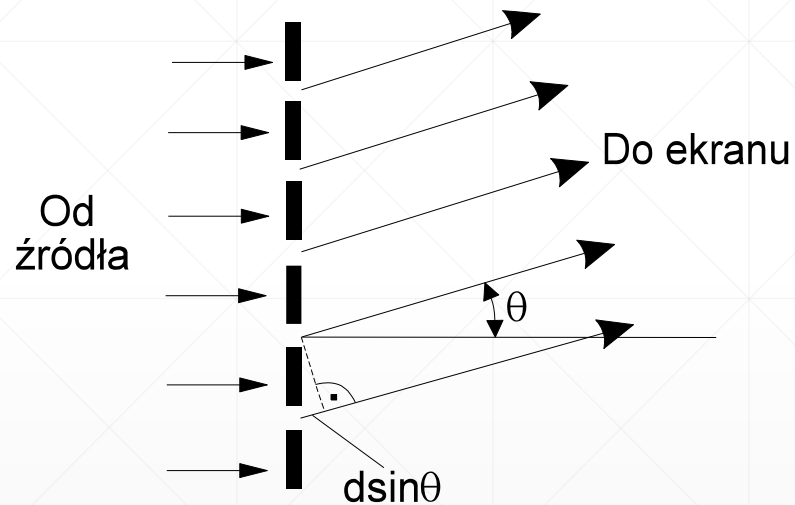
Natężenie prążków wytwarzanych w wyniku interferencji światła z dwóch szczelin jest modyfikowane przez dyfrakcje światła biegnącego z każdej ze szczelin

Siatka dyfrakcyjna

zbiór równoległych jednakowych szczelin oddległych o d (stała siatki)

siatki dyfrakcyjne:

- transmisyjne
- odbiciowe



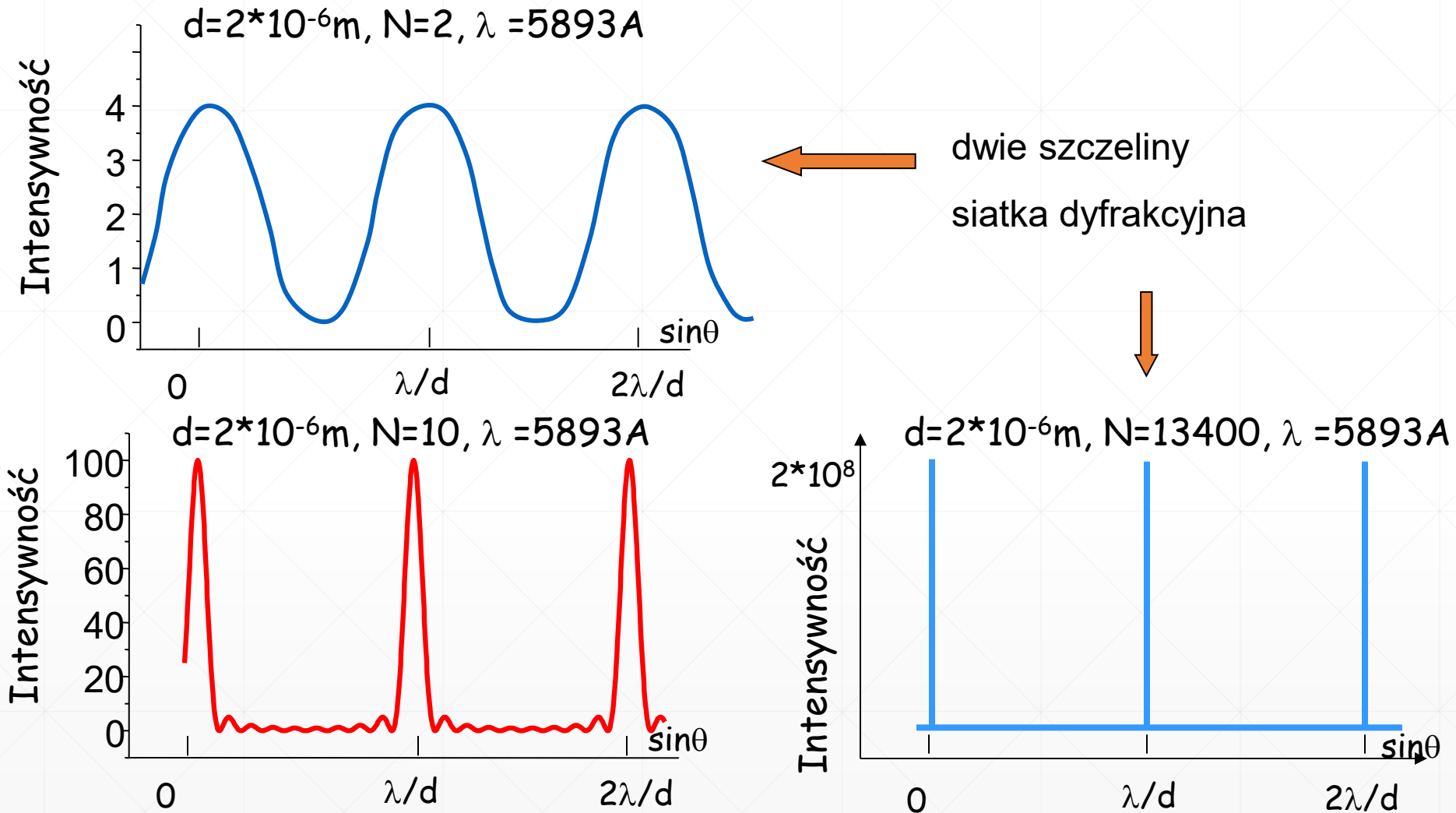
$$d \sin \theta = n \lambda$$

Natężenie I w maksimach jest N^2 razy większe

$$I = N^2 I_0$$

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

Intensywność obrazu interferencyjnego



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

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

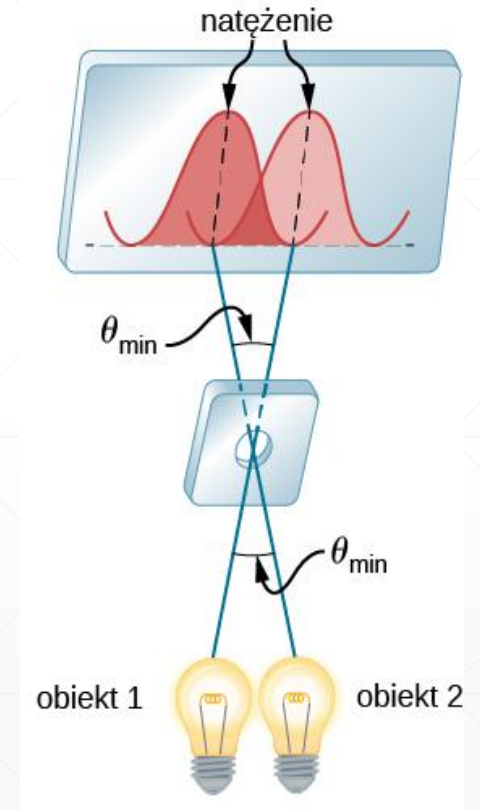
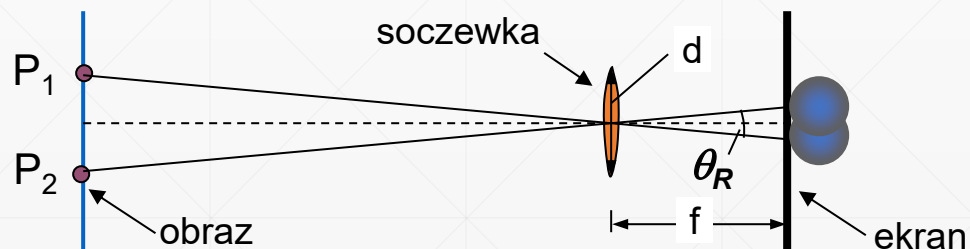
położenie pierwszego minimum dla otworu kołowego o średnicy d (kątowy rozmiar obrazu)

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

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



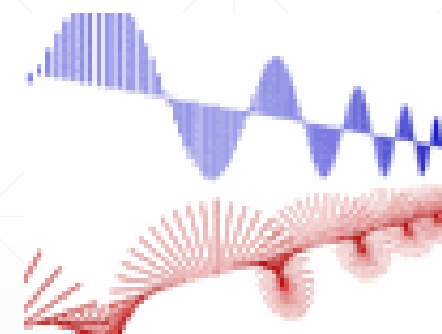
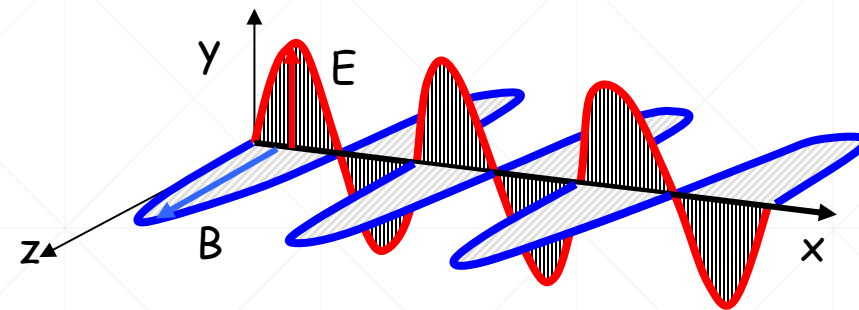
[„Fizyka dla szkół wyższych – tom 3”, www.openstax.pl]

Polaryzacja światła

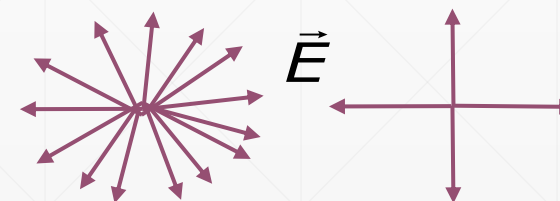
[D. Goldstein: *Polarized Light*, Marcel Dekker Inc., New York, 2003]:

Polaryzacją nazywamy wektorową naturę 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

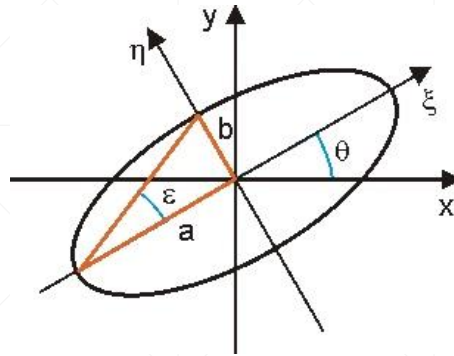
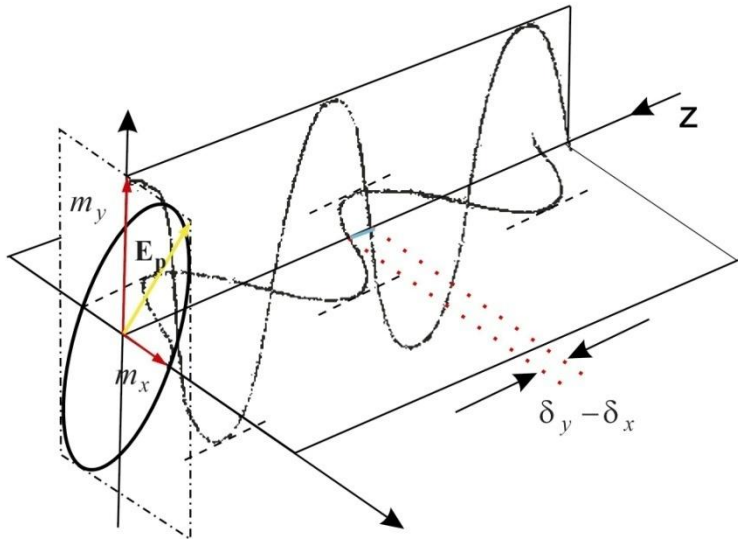


światło niespolaryzowane jest superpozycją dwóch fal spolaryzowanych wzajemnie prostopadle



$$\vec{\Psi}(\vec{r}, t) = \vec{A}(\vec{r}, t) \exp[i\phi(\vec{r}, t)] \stackrel{\text{sens fizyczny}}{\equiv} \text{Re}[\vec{\Psi}(\vec{r}, t)] \quad \vec{\Psi}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \equiv A(\vec{r}, t) \vec{e} \cos(\omega t + \vec{k} \cdot \vec{r}) \xrightarrow{\text{Dla fali płaskiej w kierunku } z'} \vec{E}(\vec{r}, t) \equiv \vec{E}_t \cos(\omega t - kz)$$



[D. Goldstein: *Polarized Light*, 2003]

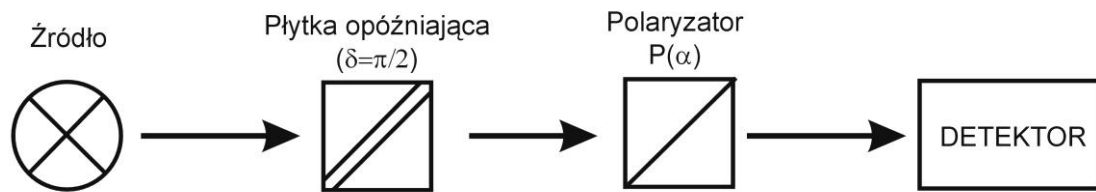
Stan polaryzacji (SOP)

Azymut Θ – kąt pomiędzy osią elipsy, a kierunkiem osi Ox

Kąt eliptyczności ε - kąt którego tangens jest stosunkiem długości małej do dużej półosi elipsy polaryzacji
 $\varepsilon = \text{tg}(b/a)$

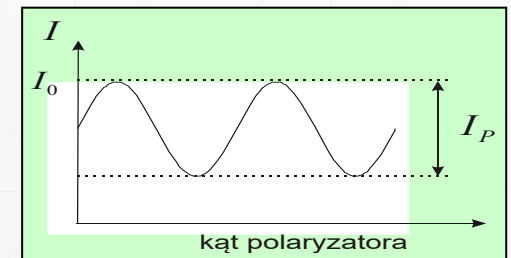
Azymut drgania elektrycznego R. wielkość drgania elektrycznego - jego kwadrat jest proporcjonalny do gęstości energii w danym pkt pola $R = (a^2 + b^2)^{1/2}$

Stopień polaryzacji (DOP) [M. Born, E. Wolf, Principle of Optics, Pergamon NY, 1968]



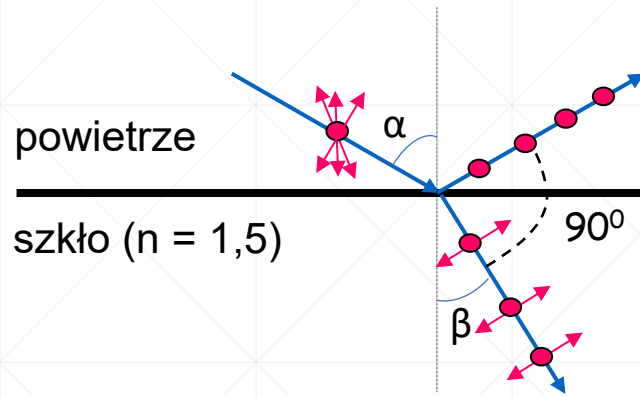
$$P = \frac{I_p}{I_0}$$

$$P \in < 0, 1 >$$



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, ●
- leżącą w płaszczyźnie padania. ◄



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 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90 - \alpha)}$



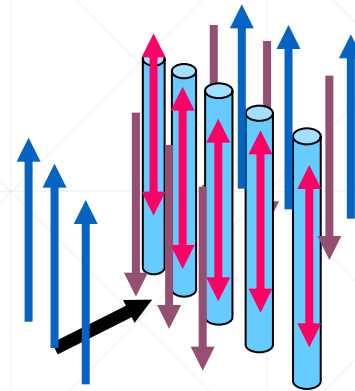
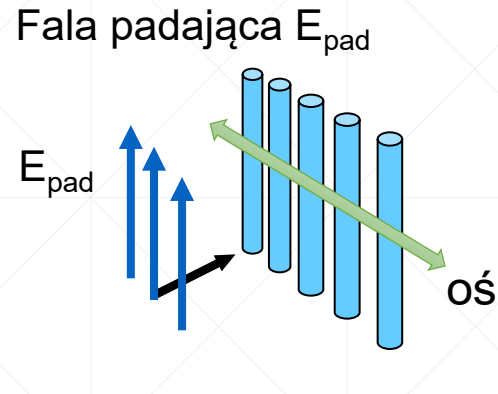
$$n = \operatorname{tg} \alpha$$

Sposoby polaryzacji 2

ZA POMOCĄ POLARYZATORÓW

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

oś polaryzatora – linia prostopadła do prętów



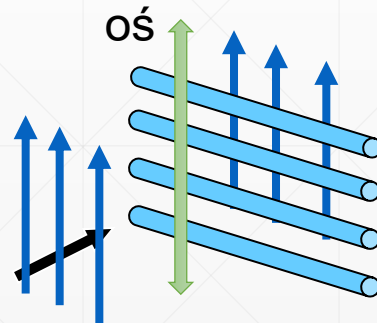
Fala przepuszczona

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

Fala wytworzona przez prąd

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

Fala spolaryzowana prostopadle do osi polaryzatora jest pochłaniana



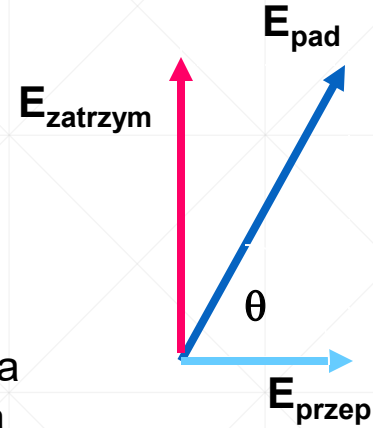
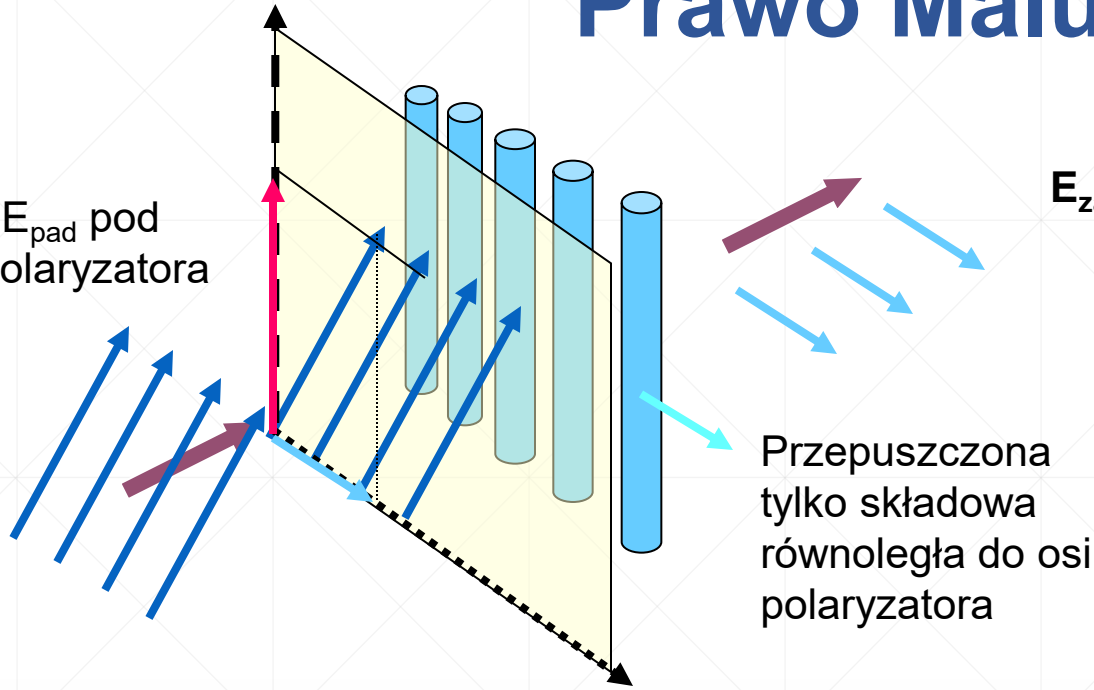
Fala przepuszczona
= fala padająca

Fala spolaryzowana równolegle do osi polaryzatora jest przepuszczana

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

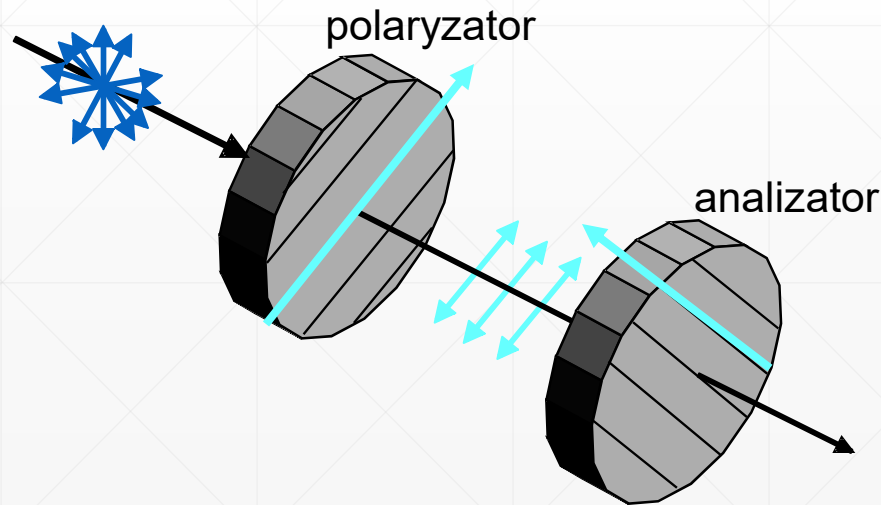
Prawo Malusa

Fala padająca E_{pad} pod kątem do osi polaryzatora



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

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



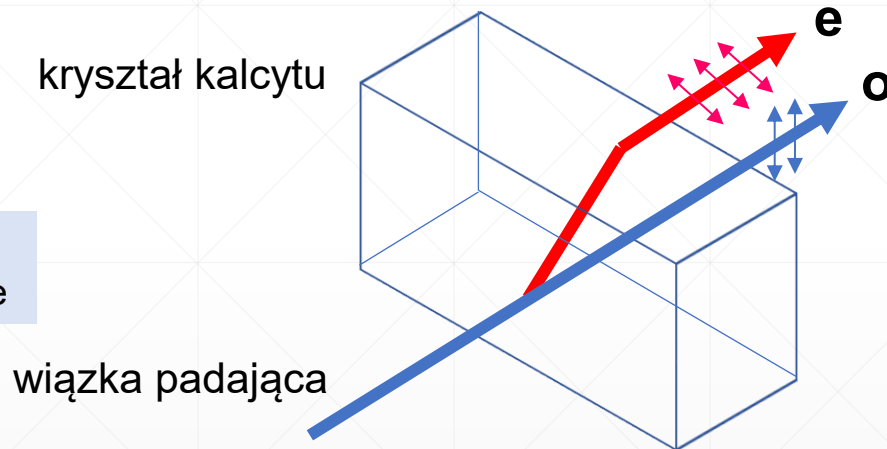
Prawo Malusa – natężenie światła spolaryzowanego po przejściu przez analizator optyczny jest proporcjonalne do kwadratu cosinusa kąta pomiędzy płaszczyznami polaryzacji światła przed i po przejściu przez analizator (reguła kwadratu cosinusa)

Sposoby polaryzacji 3

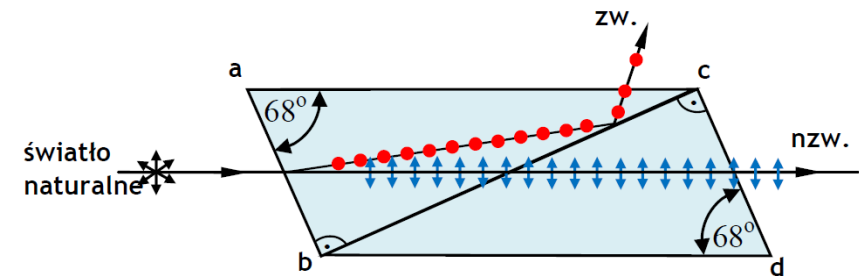
WYKORZYSTUJĄC ZJAWISKO PODWÓJNEGO ZAŁAMANIA ŚWIATŁA (DWÓJŁOMNOŚĆ)

- 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**

Q-5 Dwójłomność światła w kryształach



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)

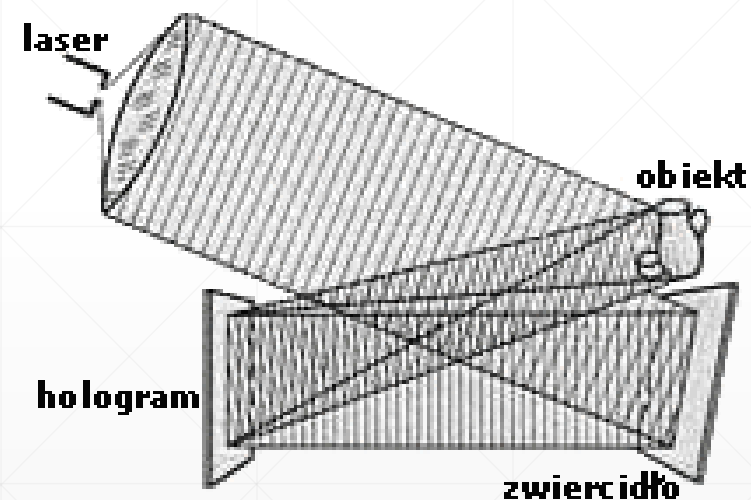


Holografia

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;
- holografie 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. λ $d \sin \theta = n\lambda$
- 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