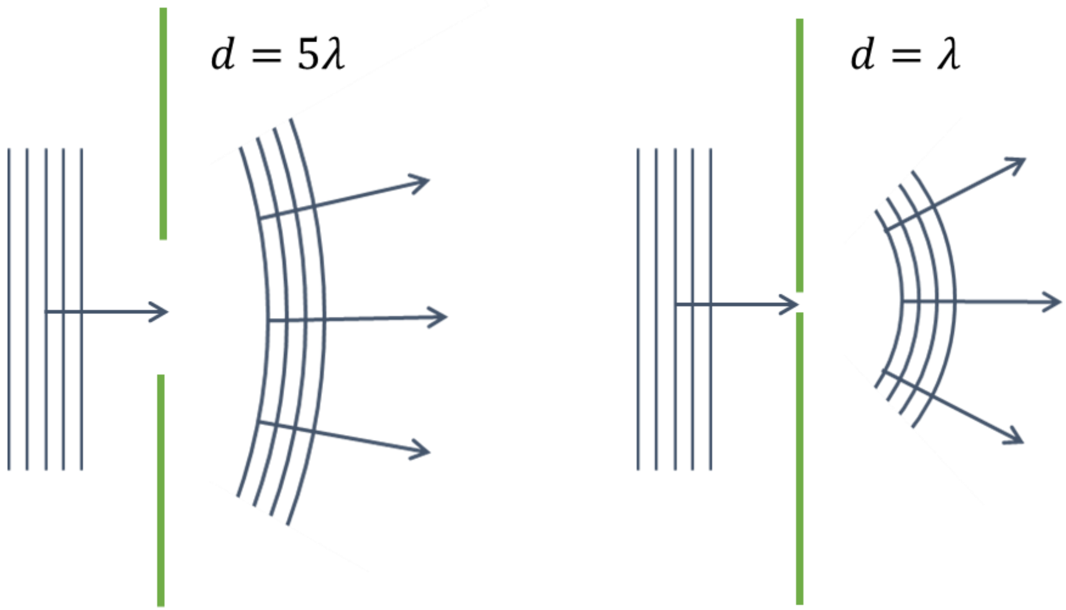
OPTYKA FALOWA

UGIĘCIE FALI

W optyce geometrycznej zakładaliśmy, że światło rozprzestrzenia się wzdłuż linii prostych i możliwe było wprowadzenie pojęcia promienia świetlnego!



1. Światło padające na szczelinę ulega ugięciu.
2. Wiązka staje się rozbieżna i nie można wydzielić z niej pojedynczego promienia.
3. Ugięcie staje się coraz wyraźniejsze, gdy szczelina staje się coraz węższa.

W zjawisku ugięcia ujawnia się falowa natura światła!

ZAKRES STOSOWALNOŚCI OPTYKI GEOMETRYCZNEJ I FALOWEJ

OPTYKA GEOMETRYCZNA

1. Wymiary liniowe wszystkich obiektów (soczewek, pryzmatów, przeszkód, szczelin) są o wiele większe od długości fali.
2. Możemy zaniedbać ugięcie i przyjąć, że światło rozchodzi się po liniach prostych zwanych promieniami.
3. Promienie światła podlegają prawom odbicia i załamania.

OPTYKA FALOWA

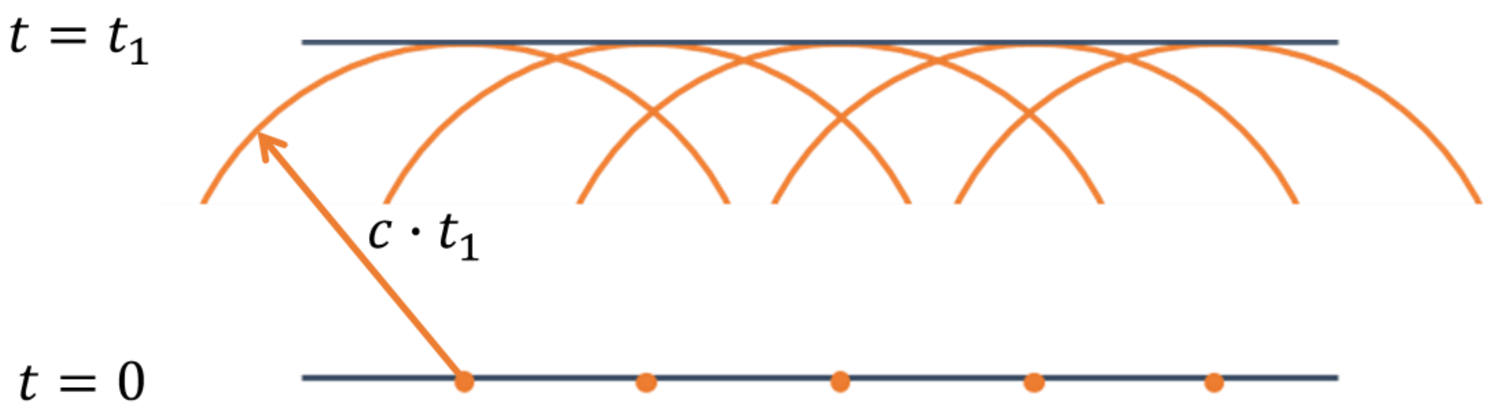
1. Wymiary liniowe obiektów np. szczelin są porównywalne z długością fali.
2. W takich warunkach ogromne znaczenie ma zjawisko ugięcia.

Optyka geometryczna stanowi szczególny przypadek optyki falowej!

ZASADA HUYGENSA

Każdy punkt, do którego dotrze zaburzenie staje się źródłem cząstkowej fali kulistej.

Wszystkie punkty czoła fali można uważać za źródła nowych fal kulistych!

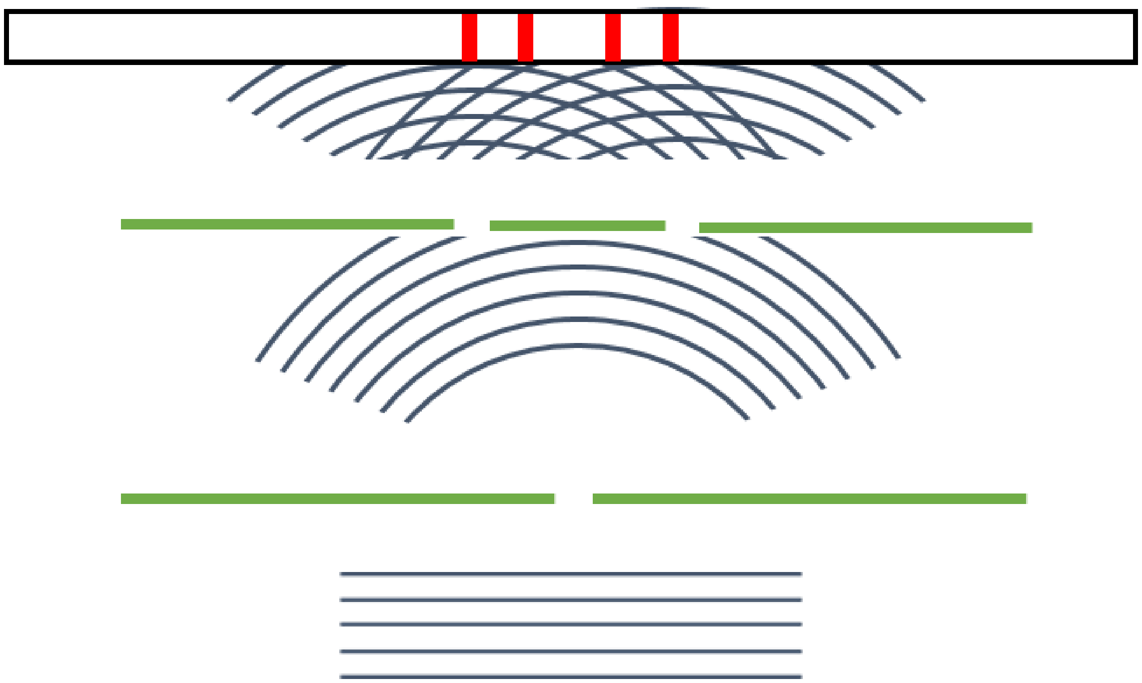


W próżni po czasie t promienie kul wynoszą ct!

Położenie czoła fali po czasie t_1 będzie dane przez powierzchnię styczną do tych fal kulistych!

INTERFERENCJA – DOŚWIADCZENIE YOUNGA

Interferencja – zjawisko nakładania się fal.



Young w swoim doświadczeniu po raz pierwszy wykazał, że zjawisko interferencji zachodzi dla światła!

OPTYKA FALOWA

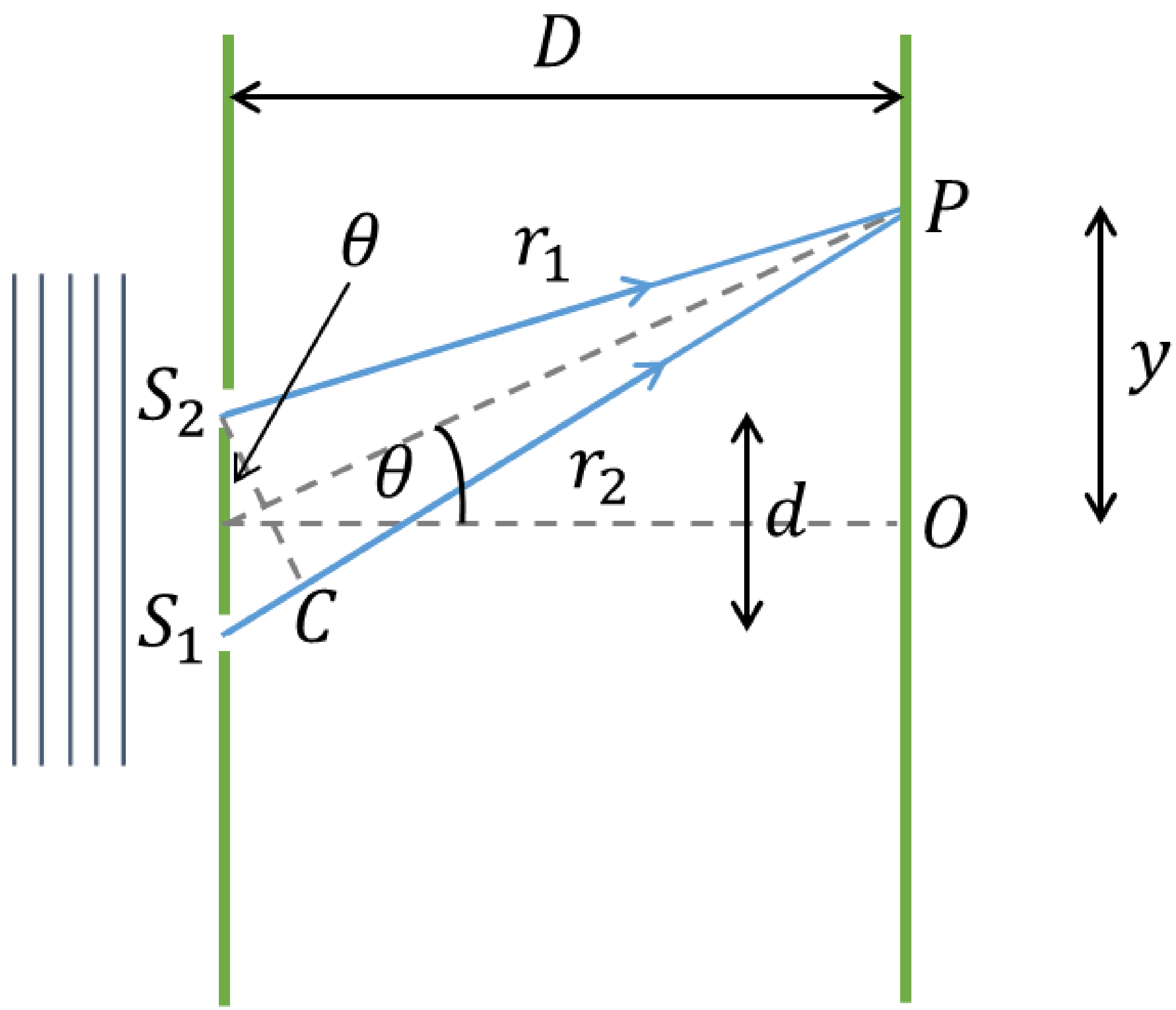
Na ekranie pojawiają się na przemian miejsca ciemne i jasne w zależności od wyniku nakładania się fal!

1. Miejsca ciemne powstają w wyniku wygaszania się interferujących fal.

2. Miejsca jasne powstają w wyniku wzajemnego wzmocnienia nakładających się fal.

3. Na ekranie obserwujemy prążki interferencyjne.

INTERFERENCJA – OPIS ILOŚCIOWY



$$S_2P = CP$$

$$D \gg d$$

$$kąt\ S_1S_2C \approx \theta$$

Promienie wychodzące ze szczelin S_1 i S_2 są zgodne w fazie, gdyż pochodzą z tego samego czoła fali płaskiej!

Drogi, po których promienie docierają do punktu P są różne, więc również ich fazy w punkcie P mogą być różne!

Różnica dróg optycznych – odcinek S_1C, który decyduje o różnicy faz promieni w punkcie P.

OPTYKA FALOWA

Aby w punkcie P wystąpiło maksimum natężenia światła, różnica dróg optycznych musi być całkowitą wielokrotnością długości fali, bo po przebyciu takiej drogi fala ma fazę taką samą jak na jej początku!

Warunek maksimum interferencyjnego:

$$S_1C = n \cdot \lambda \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

$$S_1C = d \cdot sin\theta$$

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

Warunek minimum interferencyjnego:

$$d \cdot sin\theta = (2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Aby w punkcie P wystąpiło minimum natężenia światła, różnica dróg optycznych musi być nieparzystą wielokrotnością połowy długości fali!

Przykład 1. W urządzeniu z dwiema szczelinami odległość między szczelinami wynosi $5\,mm$, przy czym znajdują się one w odległości $1\,m$ od ekranu. Na ekranie można obserwować dwa obrazy interferencyjne, jeden pochodzący od fali o długości $480\,nm$, a drugi od fali $600\,nm$. Jaka jest odległość na ekranie pomiędzy prążkami interferencyjnymi trzeciego rzędu dla tych dwóch obrazów?

Dane:
$\lambda_1 = 480\,nm$
$\lambda_2 = 600\,nm$
$d = 5\,mm$
$D = 1\,m$
$n = 3$

$$d \cdot sin\theta_1 = n \cdot \lambda_1$$

$$d \cdot sin\theta_2 = n \cdot \lambda_2$$

$$sin\theta_1 = \frac{n \cdot \lambda_1}{d} = \frac{3 \cdot 480 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-3}} = 288 \cdot 10^{-6} \approx 2{,}9 \cdot 10^{-4}$$

$$sin\theta_2 = \frac{n \cdot \lambda_2}{d} = \frac{3 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-3}} = 360 \cdot 10^{-6} \approx 3{,}6 \cdot 10^{-4}$$

$$sin\theta_1 \approx tg\theta_1 = \frac{y_1}{D}$$

$$y_1 = D \cdot sin\theta_1 = 2{,}9 \cdot 10^{-4}\ m$$

$$y_2 = D \cdot sin\theta_2 = 3{,}6 \cdot 10^{-4}\ m$$

$$y_2 - y_1 = 0{,}7 \cdot 10^{-4}\ m$$

SPÓJNOŚĆ FAL = KOHERENCJA FAL

Źródła są koherentne (spójne) jeśli różnica faz fal wychodzących z tych źródeł jest stała w czasie!

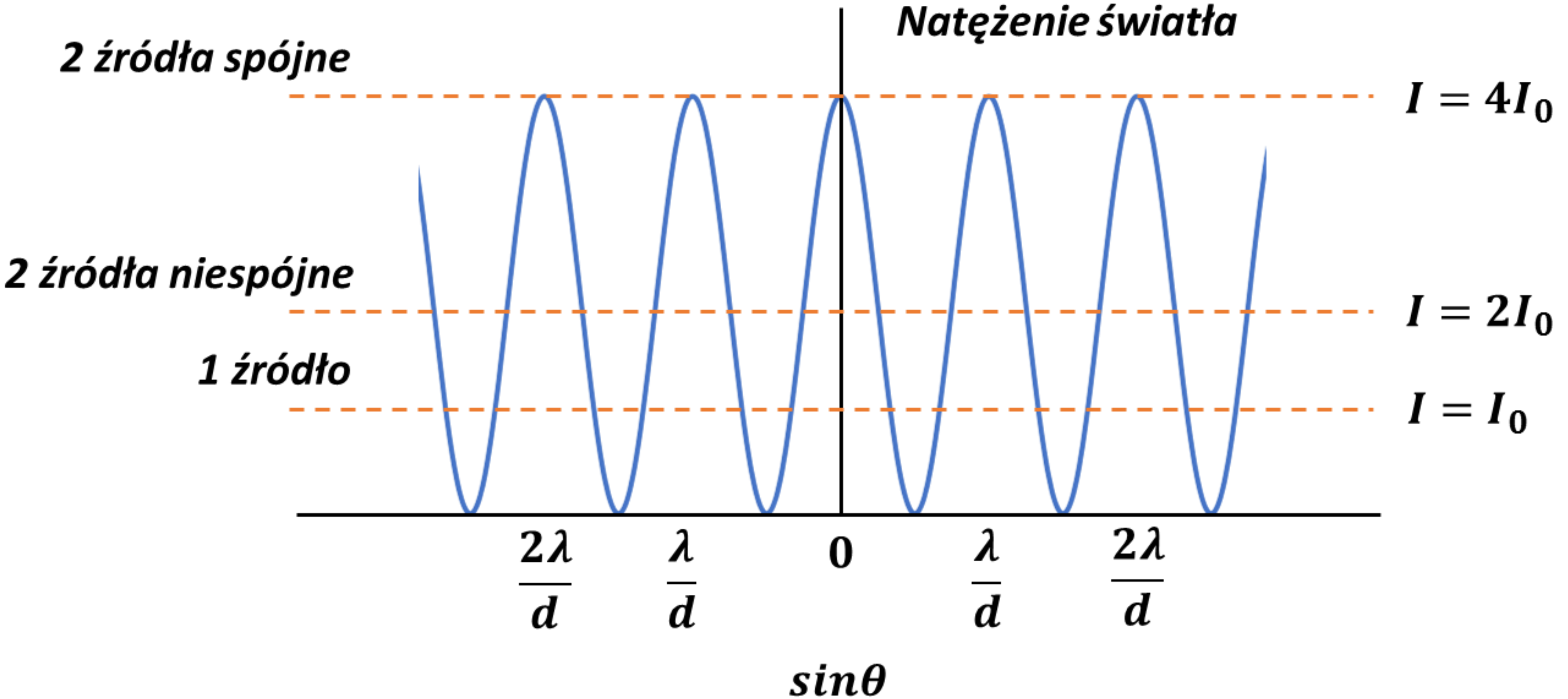
Koherencja fal jest warunkiem stabilności obrazu interferencyjnego!

Żarówki, świetlówki – światło niespójne

Lasery – światło spójne

NATĘŻENIE ŚWIATŁA W DOŚWIADCZENIU YOUNGA

Rozkłady natężenia światła w funkcji kąta będące wynikiem nakładania światła spójnego i pochodzącego ze źródeł niespójnych są zupełnie inne!



Dla światła pochodzącego ze źródeł niespójnych obserwujemy równomierne oświetlenie ekranu!

Za zmiany natężenia światła interferujących fal odpowiada wektor natężenie pola elektrycznego!

$$E_1 = E_0 \cdot sin\omega t$$

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

Gdzie:
$\varphi -$ różnica faz interferujących fal.

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \cdot (sin\omega t + \sin(\omega t + \varphi)) = 2E_0 \cdot cos\frac{\varphi}{2} \cdot sin\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$E = E_\theta \cdot sin\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right)$$

Amplituda natężenia światła jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy natężenia pola elektrycznego!

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

Wypadkowe natężenie interferujących fal spójnych o natężeniach I_0:

$$I_\theta \sim 4{E_0}^2 \cdot cos^2\frac{\varphi}{2} = 4I_0 \cdot cos^2\frac{\varphi}{2}$$

$$I_\theta = I_{max} \cdot cos^2\frac{\varphi}{2}$$

Dla $\varphi = \pi$:

$$I_\theta = 0$$

Dla $\varphi = 0$:

$$I_\theta = I_{max}$$

OPTYKA FALOWA

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

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

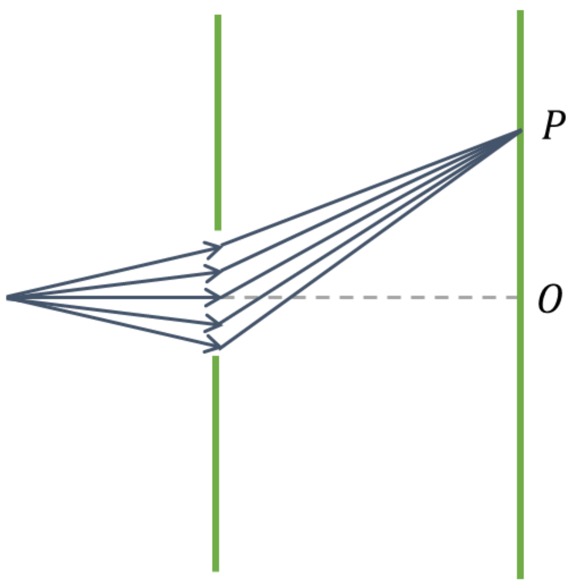
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot sin\theta$$

DYFRAKCJA

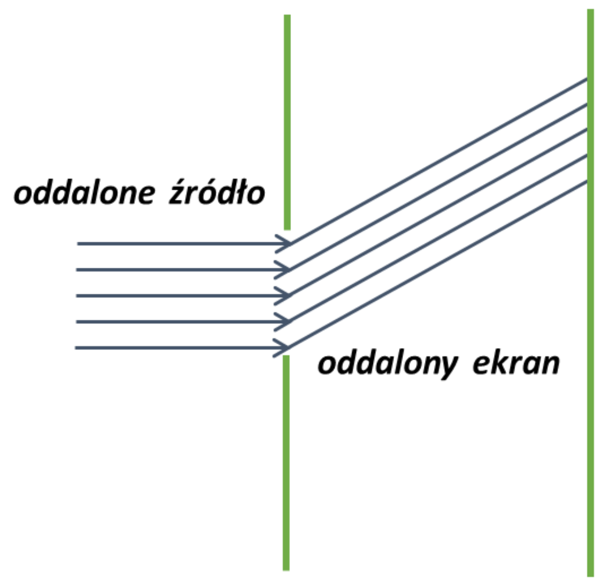
Dyfrakcja Fresnela – zjawisko obserwuje się, gdy fale opuszczające otwór nie są płaskie, a odległości źródła fal i ekranu od szczeliny są skończone.

Dyfrakcja Frauenhofera – zjawisko zachodzi, gdy źródło fal i ekran znajdują się w bardzo dużej odległości od szczeliny. Czoła fal padających i ugiętych są wówczas płaszczyznami, a promienie są równoległe.

Dyfrakcja Fresnela

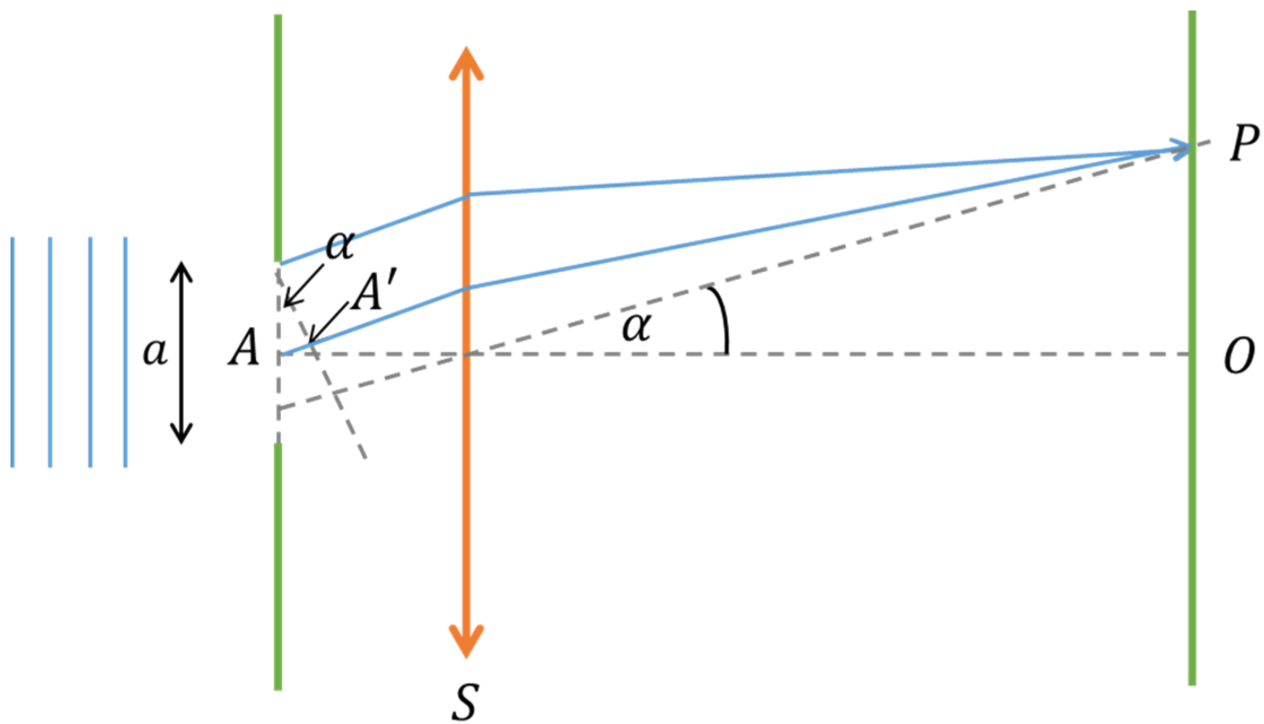


Dyfrakcja Frauenhofera



POWSTAWANIE OBRAZU DYFRAKCYJNWGO – DYFRAKCJA FRAUENHOFERA

1. Na szczelinę o szerokości a pada fala płaska.
2. W punkcie O na ekranie skupiają się promienie równoległe padające na soczewkę.
3. Promienie docierające do punktu P wychodzą ze szczeliny pod kątem α (mają swój początek u góry szczeliny i na jej środku).
4. Promień przechodzący przez środek soczewki (przerywana) nie jest odchylany.



Jeżeli dla punktu P różnica dróg AA' wynosi $\frac{\lambda}{2}$ to promienie, które mają zgodne fazy w szczelinie, w punkcie P będą miały fazy przeciwne i wygaszą się!

Każdy inny promień wychodzący z górnej połowy szczeliny będzie się wygaszał z odpowiednim promieniem z dolnej połówki leżącym niżej o $\frac{a}{2}$!

W punkcie P natężenie światła będzie równe 0 (**pierwsze minimum dyfrakcyjne**), jeżeli:

$$\frac{a}{2} \cdot sin\alpha = \frac{\lambda}{2}$$

$$a \cdot sin\alpha = \lambda$$

OPTYKA FALOWA

Ogólne wyrażenie na minimum dyfrakcyjne:

$$a \cdot sin\alpha = m \cdot \lambda \qquad m = 0, 1, 2, \ldots$$

Ogólne wyrażenie na maksimum dyfrakcyjne:

$$a \cdot sin\alpha = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad m = 0, 1, 2, \ldots$$

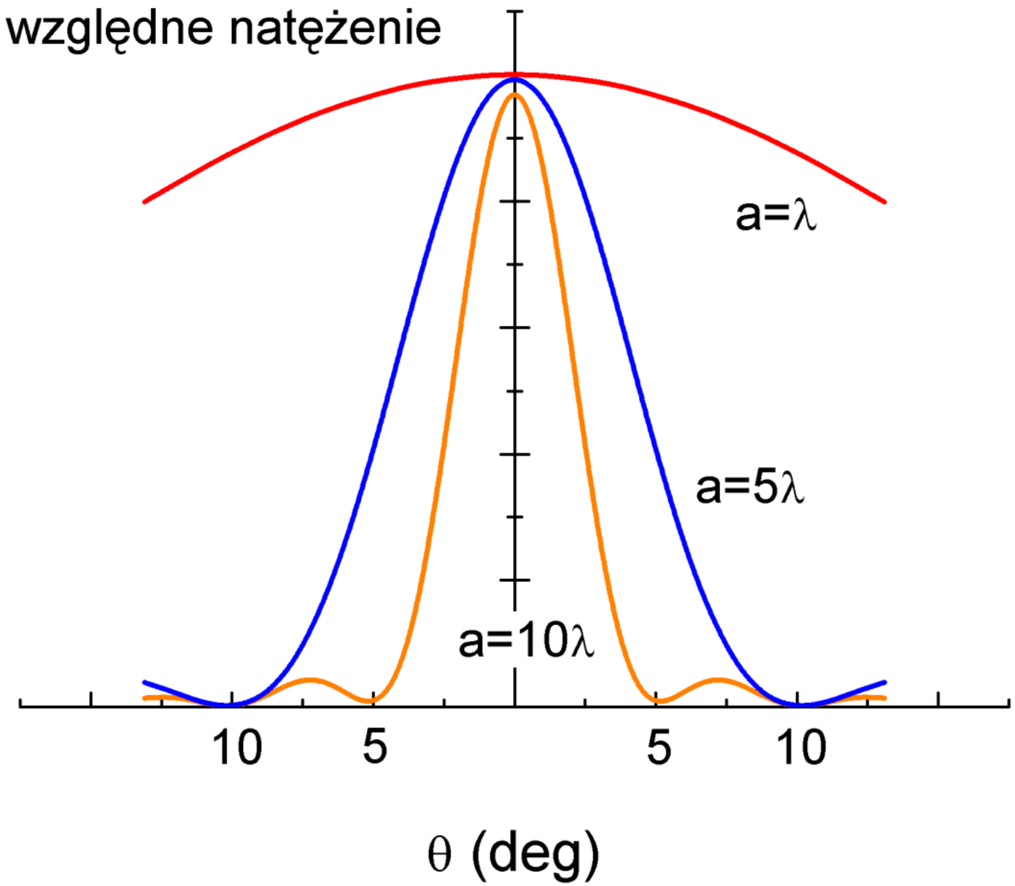
NATĘŻENIE ŚWIATŁA W OBRAZIE DYFRAKCYJNYM

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

W odróżnieniu od obrazu interferencyjnego, natężenia kolejnych maksimów dyfrakcyjnych nie są jednakowe!

Im większa różnica faz (φ), tym mniejsze natężenie maksimum!

Rozkład natężenia światła w funkcji położenia na ekranie dla różnych szerokości szczeliny (zależności I_θ od kąta θ):



SIATKA DYFRAKCYJNA = INTERFERENCJA FAL Z WIELU ŹRÓDEŁ

Interferencja na dwóch szczelinach – warunek na maksimum interferencyjnie:

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

$$\lambda = \frac{d \cdot sin\theta}{n}$$

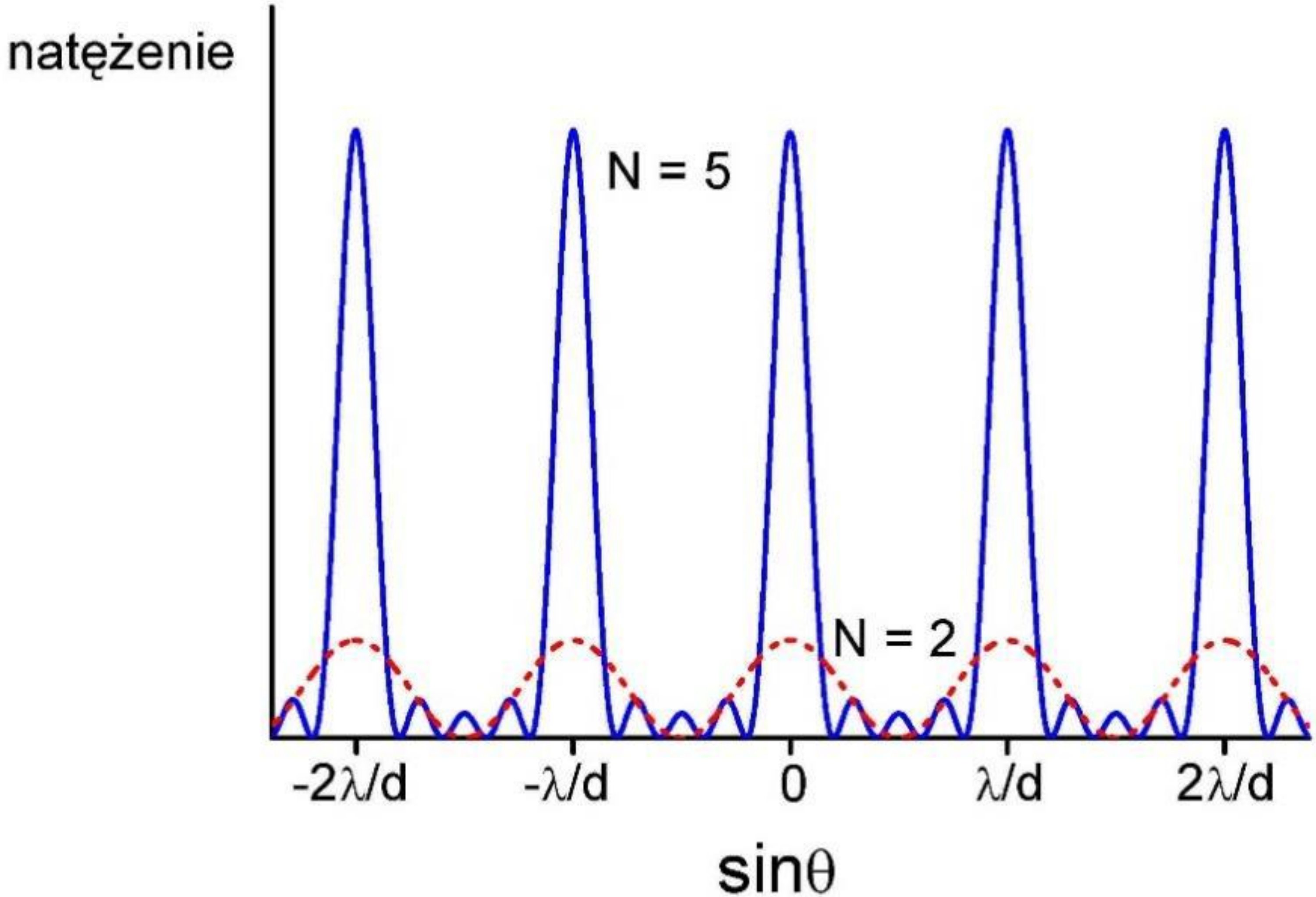
Doświadczenie Younga można wykorzystać do wyznaczenia długości fali światła monochromatycznego!

Dokładniej zrobimy to jednak stosując układ wielu szczelin!

Siatka dyfrakcyjna – układ wielu (N) równoległych do siebie szczelin.

Stała siatki dyfrakcyjnej – odległość d między szczelinami.

NATĘŻENIE ŚWIATŁA W DOŚWIADCZENIU YOUNGA I DLA SIATKI DYFRAKCYJNEJ



OPTYKA FALOWA

1. W widmie siatki oprócz maksimów głównych pojawiają się maksima poboczne.
2. Dla określonej odległości między szczelinami d i określonej długości fali λ, odległości pomiędzy głównymi maksimami przy $N = 5$ są takie jak w doświadczeniu Younga (2 szczeliny, $N = 2$), zatem położenia maksimów głównych nie zależą od N.
3. Natężenia maksimów głównych dla siatki dyfrakcyjnej są zdecydowanie większe, a ich szerokości mniejsze niż w doświadczeniu Younga!

Warunek na maksimum dla siatki dyfrakcyjnej:

$$d \cdot sin\theta = m \cdot \lambda \qquad m = 0, 1, 2, \ldots$$

Wzór ten jest identyczny jak równanie opisujące położenie kątowe maksimów interferencyjnych dla dwóch szczelin!

Dla siatki określenie położenia maksimów interferencyjnych jest łatwiejsze niż dla dwóch szczelin ze względu na ich większe natężenie i mniejszą szerokość!

Natężenie maksimów głównych:

$$I = I_0 \cdot N^2$$

$$I \sim N^2$$

Wraz ze wzrostem liczby szczelin siatki dyfrakcyjnej maksima główne stają się coraz węższe, a maksima wtórne zanikają!

Zdolność rozdzielcza siatki dyfrakcyjnej:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

Gdzie:
$\lambda -$ średnia długość fali dwóch linii ledwie rozróżnialnych w widmie siatki,
$\Delta\lambda -$ różnica między długościami tych fal.

Im większa wartość R, tym lepsza możliwość rozróżnienia maksimów obrazów dyfrakcyjnych dla dwóch fal o niewiele różniących się długościach fal!