

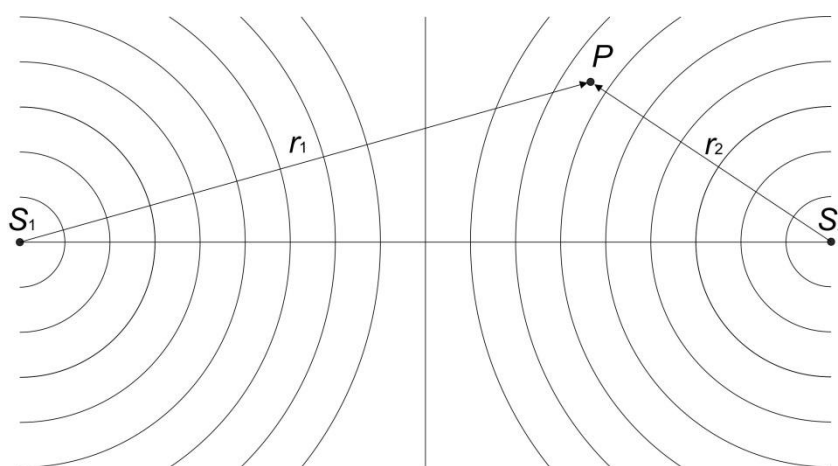
## Ćwiczenie 3

### Doświadczenie interferencyjne Younga

#### Wprowadzenie teoretyczne

Charakterystyczną cechą fal jest ich zdolność do interferencji. Światło jako fala elektromagnetyczna również może interferować. Eksperyment Younga był historycznie pierwszym, w którym zaobserwowano prążki interferencyjne utworzone przez światło widzialne. Był on ważnym przyczynkiem do ugruntowania teorii falowej światła. Ponadto posiada istotny walor dydaktyczny, gdyż pomaga zrozumieć różnicę pomiędzy światłem spójnym i niespójnym.

Wyobraźmy sobie, że dwa punktowe źródła światła  $S_1$  i  $S_2$ , pokazane na Rys. 1, emitują monochromatyczne fale sferyczne o długości  $\lambda$ .



Rys. 1 – Interferencja dwóch fal sferycznych w punkcie  $P$ .

W przypadku, gdy odległości  $r_1$ ,  $r_2$  w punkcie obserwacji  $P$  są porównywalne, co zwykle zachodzi w doświadczeniach interferencyjnych, możemy pominąć zależność modułu amplitudy fali kulistej od odległości od źródła i wówczas nasze fronty falowe są opisane funkcjami:

$$E_1(r_1, t) = A_1 \cdot e^{i(kr_1 - \omega t + \varphi_1)}, \quad (1)$$

$$E_2(r_2, t) = A_2 \cdot e^{i(kr_2 - \omega t + \varphi_2)}. \quad (2)$$

gdzie  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .  $E_1$  oraz  $E_2$  oznaczają składowe wektora pola elektrycznego wzdłuż ustalonego kierunku polaryzacji,  $r_1$ ,  $r_2$  są odległościami źródeł  $S_1$  i  $S_2$  od punktu  $P$  (Rys. 1), natomiast  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  oznaczają fazy początkowe drgań pola elektromagnetycznego, a  $A_1 > 0$  i  $A_2 > 0$  to ich amplitudy.

Detektory, w tym oko ludzkie, są czułe jedynie na natężenie pola świetlnego. Zgodnie z teorią elektromagnetyzmu, natężenie wypadkowe w punkcie  $P$  może być z dokładnością do stałej wyrażone jako kwadrat modułu wypadkowej (sumarycznej) amplitudy zespolonej pola świetlnego:

$$I(P) = |E_1 + E_2|^2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) \right], \quad (3)$$

gdzie  $I_1=A_1^2$  i  $I_2=A_2^2$  są natężeniami, odpowiadającymi źródłom  $S_1$  i  $S_2$ . Znaczy to, że natężenie pola w punkcie  $P$  miałyby wartość  $I_1$  lub  $I_2$ , gdyby falę emitowało tylko jedno ze źródeł. Zgodnie ze wzorem (3), w zależności od punktu obserwacji, wypadkowe natężenie zmienia się od wartości minimalnej:

$$I_{min} = (A_1 - A_2)^2, \quad (4)$$

która odpowiada warunkowi:

$$\frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) = \pi(2m + 1), \quad (5)$$

gdzie  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , aż do wartości maksymalnej:

$$I_{max} = (A_1 + A_2)^2, \quad (6)$$

kiedy obowiązuje równanie:

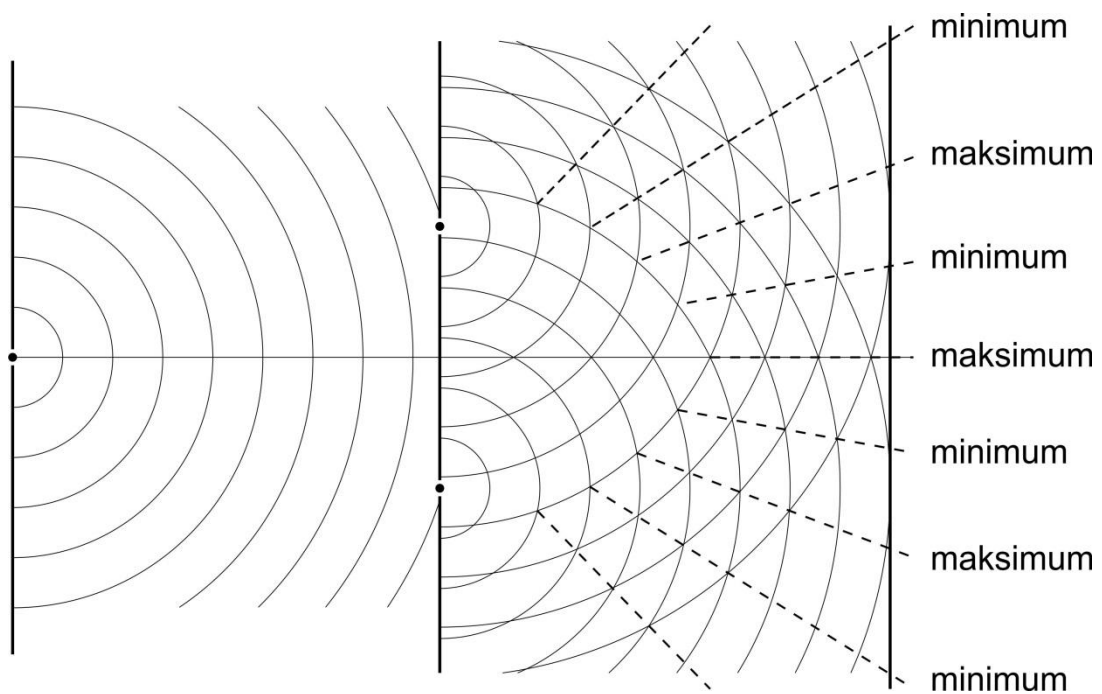
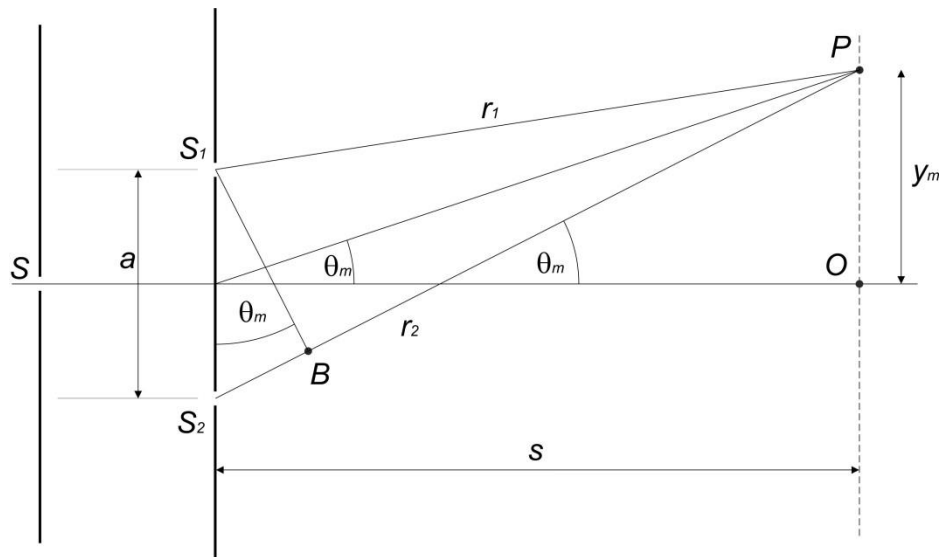
$$\frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) = 2\pi m. \quad (7)$$

W związku z powyższym, w przypadku oświetlenia monochromatycznym światłem widzialnym, obserwujemy na ekranie jasne prążki w miejscach odpowiadających warunkowi (7) lub ciemne prążki, gdy zachodzi równanie (5). Dokładne położenie powyższych prążków zależy od różnicy faz  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Na Rys. 1 pokazano sytuację kiedy  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ . Zgodnie z zależnościami (5) i (7) maksima lub minima interferencyjne tworzone przez dwa źródła punktowe zdefiniowane są równaniem  $r_1 - r_2 = const.$ , co oznacza, że leżą one w przestrzeni na hiperboloidach obrotowych.

Warunkiem zaobserwowania prążków interferencyjnych jest stała w czasie różnica faz  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Mówimy wówczas, że źródła  $S_1$  i  $S_2$  są wzajemnie spójne (lub koherentne), czyli emitują fale skorelowane ze sobą. W przypadku, gdy drgania elektromagnetyczne są emitowane niezależnie, ich fazy początkowe  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  zmieniają się w ten sposób w czasie, że różnica  $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi(t)$  jest szybkozmienną funkcją czasu. Znaczy to, że w dowolnej chwili prążki interferencyjne powstają, jednak zmieniają się ich położenia. Ponieważ każdy detektor, w tym oko ludzkie, uśrednia swoją obserwację w czasie, zatem szybko "pływające" prążki na ekranie są niezauważalne i uśrednione natężenie światła daje zgodnie ze wzorem (3) wynik  $\overline{I(P)} = I_1 + I_2 = const.$ . W takiej sytuacji, kiedy prążki interferencyjne są niewidoczne mówimy, że źródła  $S_1$  i  $S_2$  są wzajemnie niespójne (lub niekoherentne).

W praktyce wszystkie termiczne źródła światła jak żarówki, lampy monochromatyczne itp. emitują promieniowanie niespójne. Jedynym wyjątkiem jest tutaj laser, którego działanie opiera się na emisji wymuszonej, dzięki czemu poszczególne emisje fotonów są skorelowane i wypromieniowana wiązka światła charakteryzuje się wysoką spójnością.

Tym niemniej, mając do dyspozycji jedynie termiczne źródło światła, można zaobserwować zjawisko interferencji, tak jak to zrobił Young w swoim doświadczeniu zilustrowanym na Rys. 2.



Rys. 2 – Doświadczenie Younga.

Gdyby Young oświetlił szczeliny  $S_1$  i  $S_2$  bezpośrednio źródłem termicznym, prążki interferencyjne na ekranie nie powstałyby, ponieważ  $S_1$  i  $S_2$  emitowałyby światło wzajemnie niespójne. Jeżeli jednak przed szczelinami  $S_1$  i  $S_2$  jest dodatkowo umieszczona szczelina  $S$ , oświetlona źródłem termicznym: wówczas zgodnie z zasadą Huygensa każdy jej punkt staje się źródłem fali sferycznej, która z kolei pada na szczeliny  $S_1$  i  $S_2$ . Punkty tych szczelin emitują dalej wtórne fale sferyczne, ale są już one wzajemnie spójne, gdyż powstają w wyniku promieniowania tego samego punktu szczeliny  $S$ .

Jeżeli szczelina  $S$  jest umieszczona symetrycznie względem szczelin  $S_1$  i  $S_2$ , wtedy we wzorze (3) otrzymujemy  $I_1 = I_2 = I$  i  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ . W takim przypadku równanie (3) ma uproszczoną formę:

$$I(P) = 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) \right]. \quad (8)$$

Ze względu na symetrię układu, powstałe na ekranie prążki interferencyjne są równoległe do szczelin. Zgodnie z geometrią podaną na Rys. 2 dla warunku  $s \gg a$  i małych kątów  $\theta_m$  można przyjąć, że  $S_2B = r_1 - r_2$  oraz że:  $\tan \theta_m = \frac{S_2B}{a} = \frac{y_m}{s}$ .

Zatem:

$$r_1 - r_2 = \frac{y_m a}{s}, \quad (9)$$

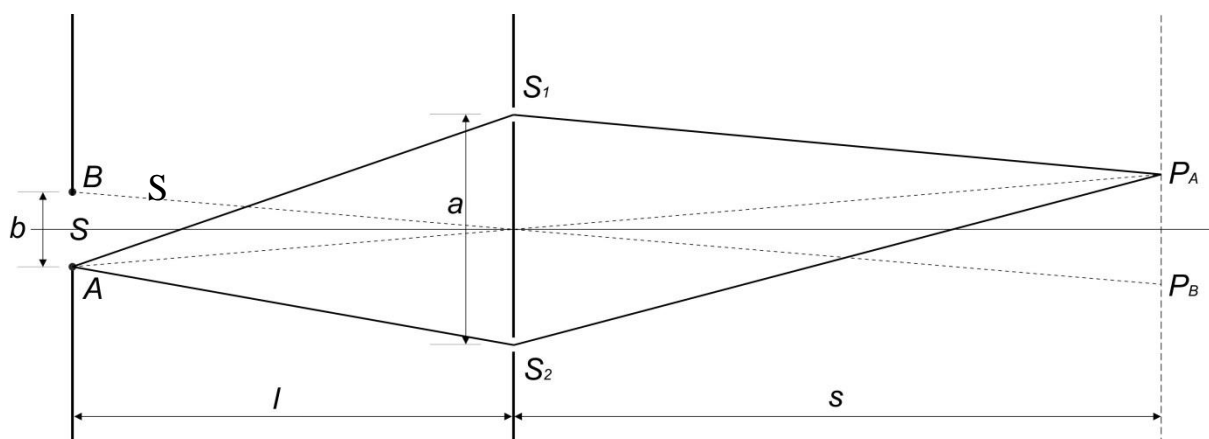
czyli równanie (8) ma postać:

$$I(P) = 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{y_m a \pi}{s \lambda} \right]. \quad (10)$$

Z powyższego wynika, że odległości między sąsiednimi maksimumami interferencyjnymi to:

$$\Delta y = \frac{s}{a} \lambda. \quad (11)$$

W doświadczeniu Younga ze światłem niespójnym ogromną rolę odgrywa szerokość pierwszej szczeliny  $S$ . Początkowo zakładaliśmy, że jest ona nieskończenie wąska, co oczywiście jest idealizacją i nie może być zrealizowane w praktyce. Realna sytuacja jest pokazana na Rys. 3, gdzie  $A$  i  $B$  oznaczają krawędzie szczeliny  $S$  o szerokości  $b$ . Leży ona w odległości  $l$  od płaszczyzny szczelin  $S_1$  i  $S_2$ .



Rys. 3 – Doświadczenie Younga – szczelina  $S$  o skończonej szerokości.

Ze względu na symetrię zagadnienia punkty szczeliny  $S$ , leżące na prostych równoległych do krawędzi  $A$  i  $B$  tworzą te same prostoliniowe prążki interferencyjne. Jednakże układy prążków są wzajemnie przesunięte w zależności od odległości punktu szczeliny  $S$  od krawędzi  $A$  i  $B$ .

Linia centralna prążków interferencyjnych, które odpowiadają punktom przy krawędzi  $A$ , pojawi się na ekranie w punktach wzdłuż krawędzi  $P_A$ , które spełniają warunek:  $AS_2 + S_2P_A = AS_1 + S_1P_A$ .

Przy warunkach  $l \gg b$  i  $s \gg a$ , co w praktyce zachodzi zawsze (dla czytelności na Rys. 3 odległości  $b$  i  $a$  zostały celowo zaznaczone w przesadzonej skali), współrzędna  $y_A$  punktów  $P_A$  spełnia warunek:  $\frac{y_A}{s} = \frac{b}{2l}$ , czyli:

$$y_A = \frac{bs}{2l}. \quad (12)$$

Analogicznie, linia symetrii układu prążków interferencyjnych odpowiadających punktom szczeliny  $S$  przy krawędzi  $B$  ma współrzędną:

$$y_B = -\frac{bs}{2l}. \quad (13)$$

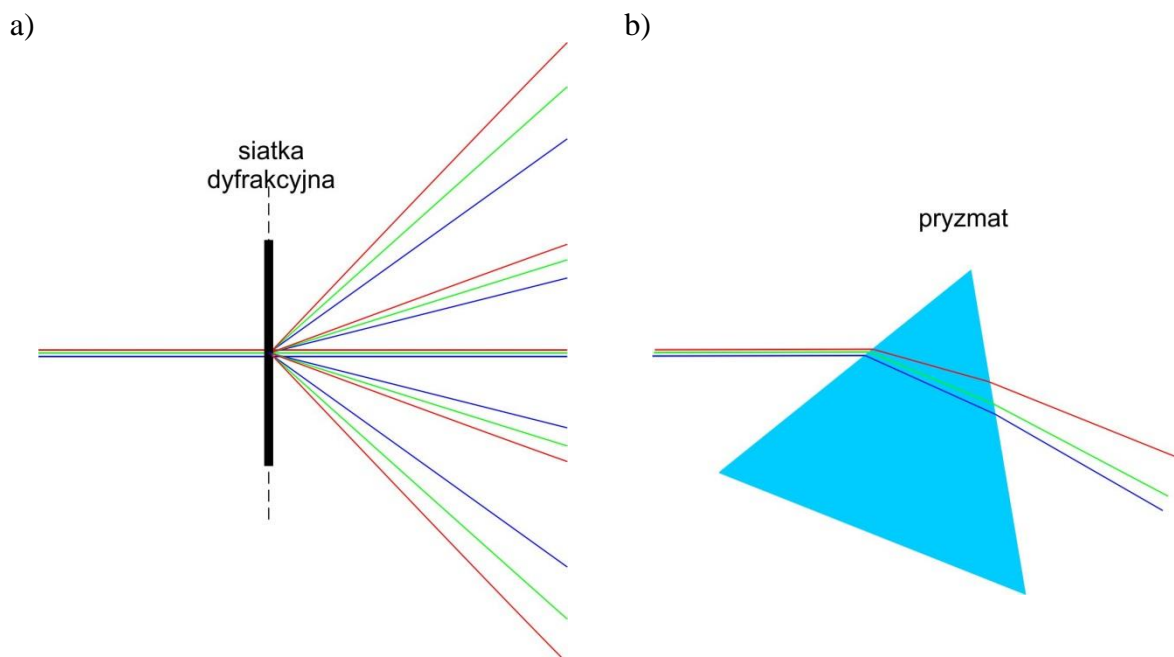
Jeżeli  $y_A - y_B = \frac{\Delta y}{2}$ , co jest równoznaczne równaniu:

$$\frac{b}{l} = \frac{\lambda}{2a}, \quad (14)$$

wówczas maksima interferencyjne jednego układu ( $P_A$ ) pokrywają się z minimami drugiego ( $P_B$ ). W efekcie prążki związane z różnymi punktami szczeliny  $S$  "zamazują się wzajemnie" i obserwujemy jednorodnie oświetlony ekran. Jak widać kontrast prążków interferencyjnych zależy istotnie od szerokości szczeliny  $S$ .

Z drugiej strony przy ustalonej szerokości szczeliny  $S$  widzialność prążków interferencyjnych zależy od odległości  $a$  między szczelinami  $S_1$  i  $S_2$ . Przy zwiększaniu  $a$  prążki stają się coraz słabsze i zanikają przy warunku (14). Wyznaczając doświadczalnie odpowiednią wartość  $a$  i znając długość fali  $\lambda$ , można określić iloraz  $\frac{b}{l}$  ze wzoru (14). Iloraz ten jest rozmiarem kątowym szczeliny  $S$  obserwowanej z płaszczyzny szczelin  $S_1$  i  $S_2$ . Taki sposób został wykorzystany do pierwszego pomiaru wielkości kątowych odległych gwiazd. Tak więc po wielu latach okazało się, że stare doświadczenie Younga ma również głęboki walor praktyczny.

Dotychczasowe rozważania przeprowadzono dla światła quasi-monochromatycznego. W przypadku źródła światła polichromatycznego uzyskany obraz prążków interferencyjnych będzie superpozycją wielu rozkładów dla każdej długości fali światła emitowanego przez źródło. Przykładowo dla lampy sodowej, emitującej światło o dwóch długościach fali (tzw. dublet sodowy), powinno się zaobserwować dwa rozkłady prążków o różnych odległościach wzajemnych, zgodnie z zależnością (11). Konsekwentnie, użycie lampy halogenowej emitującej światło z całego zakresu widzialnego długości fal, spowoduje powstanie rozmytych, tęczyowych prążków. Ugięcie (czyli dyfrakcja) światła czerwonego jest największe, co oznacza, że czerwone fragmenty prążków interferencyjnych znajdują się dalej od osi symetrii (Rys. 4a). Ugięcie światła niebieskiego jest najmniejsze. Jest to zależność odwrotna w stosunku do obserwowanej w zjawiskach refrakcyjnych, tj. w załamaniu światła (Rys. 4b). W niniejszym ćwiczeniu możliwe będzie eksperymentalne potwierdzenie tego faktu.



Rys. 4 – Dyfrakcja (a) i załamanie (b) trzech barw światła.

Siatki dyfrakcyjne, czyli zwielnokrotnione szczeliny z doświadczenia Younga znajdują szerokie zastosowanie w spektrometrii, gdyż umożliwiają rozłożenie badanego światła na składowe barwne i przez to analizę składu widmowego promieniowania np.: gwiazd, żarówek, laserów, rozgrzanych obiektów, a nawet światła odbitego od lakieru samochodów.

### Przebieg ćwiczenia

- 1) Przeprowadzenie doświadczenia Younga według schematu pokazanego na Rys. 2, przy oświetleniu światłem białym z oświetlacza halogenowego.
  - a) Optymalizacja sposobu oświetlenia szczeliny w celu uzyskania jak najjaśniejszych prążków. Wykorzystanie światłomierza.
  - b) Obserwacja widzialności prążków interferencyjnych w zależności od szerokości szczeliny  $S$ . Dokumentacja fotograficzna.
  - c) Pomiar szerokości granicznej szczeliny, gdy kontrast prążków spadnie do zera.
  - d) Obserwacja widma światła po przejściu przez wąską szczelinę i pryzmat szklany.
- 2) Przeprowadzenie doświadczenia przy oświetleniu światłem monochromatycznym lampy sodowej.
- 3) Obserwacja prążków interferencyjnych poprzez oświetlenie pierwszej szczeliny światłem laserowym po przejściu przez wirującą matówkę.
- 4) Przeprowadzenie doświadczenia przy oświetleniu światłem laserowym bez matówki.
- 5) Wyznaczenie odległości  $a$  między szczelinami ze wzoru (11) na podstawie pomiaru odległości pomiędzy prążkami  $\Delta y$  i znanej długości fali  $\lambda=632,8$  nm.
- 6) Sprawdzenie wyników z punktu 5) na podstawie pomiaru odległości  $a$  przy pomocy mikroskopu.