

## Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki płasko-wypukłej metodą pierścieni Newtona

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie ze zjawiskiem interferencji światła, pomiar promienia soczewki płasko-wypukłej.
- II. Przyrządy:** lampa sodowa, soczewka płasko-wypukła, płasko-równoległa płytką szklaną, mikroskop.
- III. Literatura:** [1] J. L. Kacperski, I pracownia fizyczna  
[2] T. Dryński, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki  
[3] A. Zawadzki, H. Hofmokl, Laboratorium fizyczne.

### IV. Wprowadzenie

Koncepcje korpuskularnej i falowej teorii światła narodziły się w XVII wieku. Pierwszą zaproponował I. Newton (1643 – 1727) traktując światło jako strumienie cząstek. Falową teorię tworzyli R. Hooke (1635 – 1703) i Ch. Huygens (1629 – 1695) a przybrała postać w miarę zwartej teorii dopiero w latach dwudziestych XIX wieku. Teoria korpuskularna Newtona nie pozwalała skonstruować jednolitego schematu wyjaśniającego wszystkie zjawiska interferencji.

Dziś wiemy, że światło wykazuje dwoistą naturę – korpuskularno-falową. W pewnych zjawiskach zachowuje się jak strumień cząstek – fotonów (np. efekt fotoelektryczny) a w innych (dyfrakcja, interferencja) jak fala.

W ujęciu falowym światło jest częścią widma fal elektromagnetycznych, stanowiącym przedział fal od  $\lambda_f = 380$  nm (światło o barwie fioletowej) do  $\lambda_{cz} = 780$  nm (światło o barwie czerwonej).

Falę elektromagnetyczną opisuje wektor natężenia pola elektromagnetycznego  $\vec{E}(r,t)$  oraz prostopadły do niego wektor indukcji pola magnetycznego  $\vec{B}(r,t)$ . Za zjawiska optyczne odpowiedzialny jest wektor  $\vec{E}(r,t)$ . Dlatego harmoniczną falę świetlną opisujemy funkcją falową postaci

$$E(r,t) = E_0(r) \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right) + \varphi \right]$$

gdzie  $T$  – okres drgań oscylatora źródła światła (fali świetlnej,  $r$  – odległość punktu od źródła,  $\varphi$  – faza początkowa,  $E_0(r)$  – wartość amplitudy natężenia pola elektrycznego w odległości  $r$  od źródła światła.

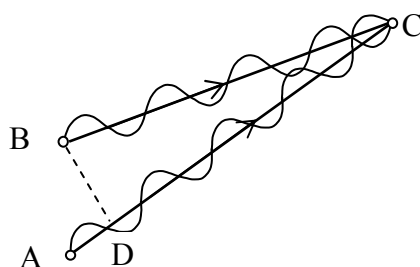
Natężenie  $I$  fali świetlnej rejestrowane przez nasze oko i przyrządy optyczne jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy  $E_0(r)$ .

**Zjawisko interferencji** to nakładanie się fal, rozchodzących się w przestrzeni z jednakowymi częstotliwościami, prowadzące do zwiększenia lub zmniejszenia amplitudy fali wypadkowej (a tym samym i natężenia fali) w pewnych punktach przestrzeni. Innymi słowy w pewnych punktach stale jest jasno, a w innych stale ciemno. Interferencja jest cechą ogólną wszystkich fal, nie tylko świetlnych. Aby zjawisko interferencji mogło być zarejestrowane okiem lub innym przyrządem, konieczna jest stała w czasie różnica faz, nakładających się fal świetlnych docierających do ob-

serwowanego punktu. Tylko wtedy obraz interferencyjny nie zmienia się w czasie. W przeciwnym przypadku miejsca wzmocnień wędrowałyby przypadkowo po całym polu interferencyjnym.

Jeśli spotykające się fale mają tę samą częstotliwość i stałą w czasie różnicę faz, to takie fale nazywamy *spójnymi* i tylko takie fale dają efekty interferencyjne.

Rozpatrzmy dwie fale spójne, biegnące ze źródeł A i B spotykające się w punkcie C. Fale w punkcie C interferują czyli nakładają się. Wynik interferencji jest uzależniony od różnicy faz spotykających się fal.



**Rys. 1** Interferencja dwóch ciągów falowych

Jeżeli fale w chwili wyjścia ze źródeł A i B były zgodne w fazie, to różnica faz w punkcie C może powstać tylko z powodu różnicy ich dróg optycznych. Droga optyczna jest iloczynem drogi geometrycznej i współczynnika załamania światła  $n$ . Ponieważ dla powietrza  $n \approx 1$ , to droga optyczna w powietrzu jest równa drodze geometrycznej. Wprowadźmy oznaczenia:  $AC = r_1$ ,  $BC = r_2$ ,  $AD = \Delta r$

Dla różnicy dróg  $\Delta r$  równej całkowitej wielokrotności długości fali

$$\Delta r = r_2 - r_1 = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

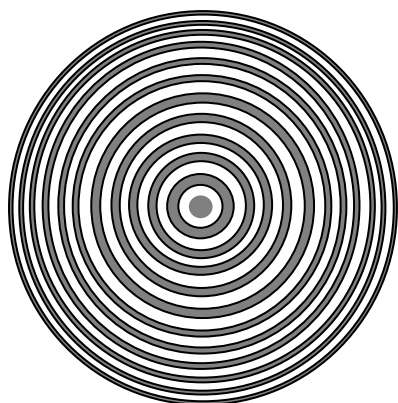
w miejscu spotkania się fal, mamy wzmocnienie drgań. Natomiast jeśli różnica dróg jest równa nieparzystej wielokrotności  $\lambda/2$

$$\Delta r = r_2 - r_1 = (m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

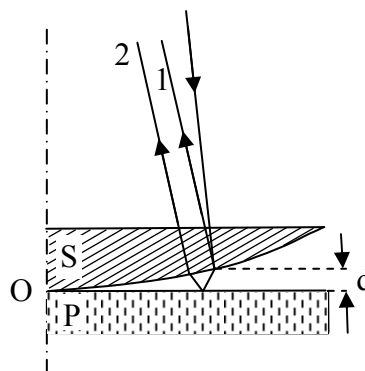
to mamy wygaszanie fal i drgania znoszą się. Obserwuje się na przemian jasne i ciemne prążki.

Dobrym sposobem obserwowania zjawiska interferencji jest zestaw złożony z płytki szklanej i soczewki płasko-wypukłej. Za pomocą takiego zestawu można uzyskać na przemian jasne i ciemne pierścienie interferencyjne, które były obserwowane już w XVII wieku (rys.2). Zostały odkryte przez R. Hooke'a a zbadane po raz pierwszy przez I. Newtona.

Zestaw składa się z płasko-równoległej płytki szklanej i soczewki płasko-wypukłej o dużym promieniu krzywizny w porównaniu z grubością płytki, oświetlonych światłem jednorodnym. Soczewka styka się z płytką szklaną P w punkcie O (rys.3). Oświetlona jest równoległą wiązką światła z lampy sodowej padającego w przybliżeniu pionowo, kąt padania jest bliski zera. Grubość  $d$  warstwy powietrza, pomiędzy soczewką S a płytką zmienia się w sposób ciągły od środka O do brzegów soczewki. Interferencja zachodzi między promieniem odbitym od dolnej powierzchni soczewki (promień 1) i promieniem odbitym od górnej powierzchni płytki (promień 2). W tym przypadku, mimo że światło pochodzi ze zwykłego źródła (lampy sodowej), wiązki są spójne, ponieważ każdy ciąg falowy dochodzący do warstwy powietrza o grubości  $d$  ulega rozszczepieniu na dwa ciągi (promienie 1 i 2), które następnie łączą się ze sobą po przebyciu różnych dróg.



Rys. 2 Pierścienie Newtona



Rys. 3 Przebieg wiązek światła w układzie

W miejscach, dla których to zachodzi obserwuje się koncentrycznie rozmieszczone jasne i ciemne pierścienie. Całkowite wygaszenie przypada w połowie grubości pierścieni ciemnych natomiast maksymalne wzmocnienie w połowie grubości pierścieni jasnych. Ciemne pierścienie odpowiadają takiej grubości warstwy powietrza, dla której różnica dróg optycznych pomiędzy dwoma ciągami interferujących fal jest równa nieparzystej liczbie półfal.

Środek pierścieni jest ciemny. Jest to doświadczalne potwierdzenie faktu, że chociaż różnica dróg geometrycznych promieni wynosi zero (soczewka przylega do płytki), to różnica dróg optycznych wynosi  $\lambda/2$ . Promień biegnący w powietrzu (po wyjściu z soczewki) doznaje bowiem przy odbiciu od powierzchni szklanej płytki zmiany fazy na przeciwną (zmiana fazy o  $180^\circ$ ) co odpowiada drodze  $\lambda/2$ . Natomiast promień, który biegnie w soczewce, odbija się od dolnej powierzchni i nie zmienia fazy. W przybliżeniu różnica dróg geometrycznych promieni jest więc równa  $2d + \lambda/2$ .

Ciemne pierścienie powstaną zatem dla grubości  $d$  warstwy powietrza spełniającej warunek

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad d = m \frac{\lambda}{2}$$

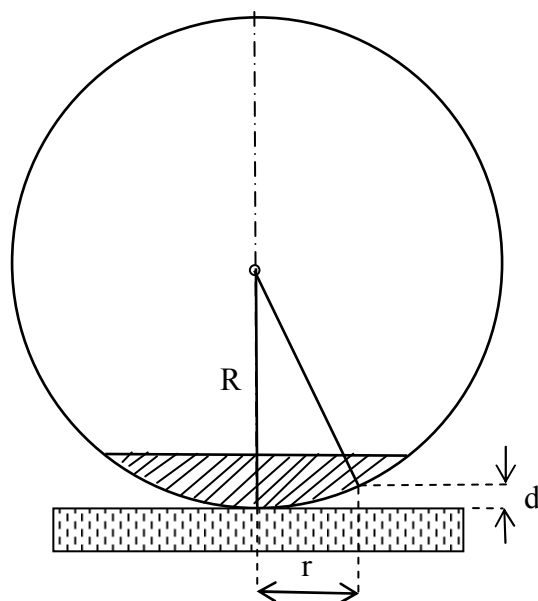
Pierwszy ciemny pierścień powstaje na soczewce w takiej odległości od jej środka, która odpowiada grubości warstwy powietrza  $d_1 = \lambda/2$ ,  $m$ -ty ciemny pierścień dla grubości

$$d_m = \frac{m\lambda}{2} \quad (2)$$

Stąd długość fali światła jednorodnego wynosi

$$\lambda = \frac{2d_m}{m} \quad (3)$$

Środkową ciemną plamę możemy traktować jako pierścień zerowego rzędu.



**Rys.4** Geometryczna interpretacja warunku interferencji

Jeżeli promień krzywizny soczewki  $R$  jest dużo większy od promienia  $r$  pierścienia ciemnego i grubości warstwy powietrza  $d$  (rys.4), to można napisać:

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = R^2 - R^2 + 2Rd - d^2 \cong 2Rd$$

Stąd

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (4)$$

W szczególności, gdy wybierzemy pierścień o numerze  $m$ , to mamy

$$d_m = \frac{r_m^2}{2R}$$

gdzie  $r_m$  – promień  $m$ -tego ciemnego pierścienia,  $d_m$  – grubość warstwy powietrza odpowiadająca  $m$ -temu pierścieniowi ciemnemu.

Gdy porównamy wzory (2) i (4) to otrzymamy

$$\frac{m\lambda}{2} = \frac{r_m^2}{2R}$$

Stąd

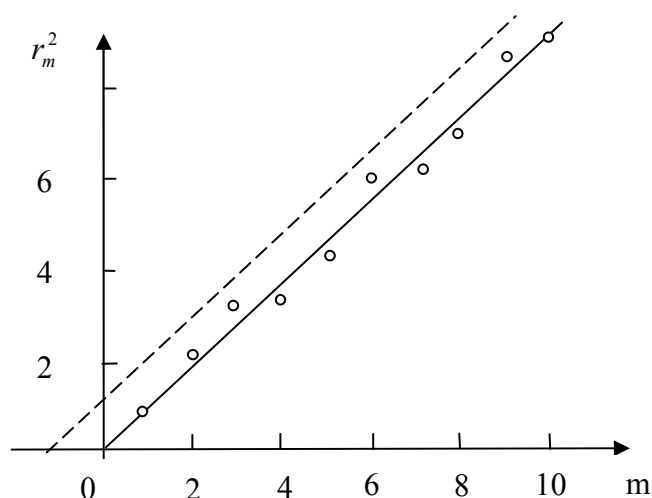
$$r_m^2 = m\lambda R \quad (5)$$

Równanie (5) można sprowadzić do postaci liniowej:  $y = ax$  przez podstawienie  $y = r_m^2$ ,  $x = m$ , wtedy współczynnik kierunkowy prostej będzie równy  $a = R\lambda$ .

Znajdując współczynnik nachylenia  $a$  prostą metodą najmniejszych kwadratów lub graficznie, możemy obliczyć jedną z pozostałych dwu wielkości ( $R$  lub  $\lambda$ ), np

$$R = \frac{a}{\lambda} \quad (6)$$

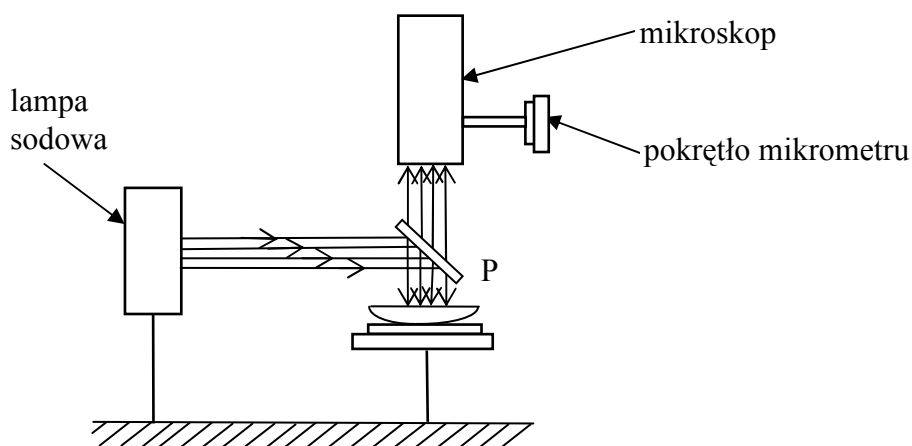
Oczywiście długość fali  $\lambda$  dla światła sodowego odczytuje się wtedy z tablic.



Rys. 5 Liniowa zależność pomiędzy kwadratem promienia pierścienia i jego „numerem”

## V. Układ pomiarowy

Na rys.6 przedstawiony jest schematycznie układ pomiarowy. Jednobarwne światło z lampy sodowej pada na płytkę P ustawioną pod kątem w taki sposób, że częściowo odbija się od niej i pada w dół na soczewkę i płytkę szklaną, dając skutek odbicia i interferencji obserwowane przez nas pierścienie Newtona. Promienie odbite ku górze przechodzą przez płytkę P i trafiają do obiektywu mikroskopu i oka obserwatora. Mikroskop zaopatrzony jest w okular z nicią pajączą i ma przesuwany w płaszczyźnie poziomej tubus mikroskopu. Mechanizm przesuwu tubusa sprzężony jest ze śrubą mikrometryczną. Położenie nici pajączej odczytuje się korzystając z poziomej milimetrowej skali oraz skali bębna śruby mikrometrycznej.



Rys.6 Układ pomiarowy

## VI. Pomiary

1. Ustawić nić pajączą okularu na  $m + 1$  ciemnym pierścieniu widocznym z lewej strony środkowego ciemnego pierścienia (gdy  $m = 15$  będzie to 16-ty pierścień). Pokrętłem mikrometru

w czasie pomiarów należy obracać tylko w jedną stronę – w ten sposób eliminujemy błędy związane z luzem na śrubie mikrometrycznej mikroskopu.

- Odczytać położenie  $m$ -tego ciemnego pierścienia, potem  $m - 1$  aż do  $m - 9$ . W ten sposób dokonamy odczytów położenia kolejnych 10-ciu pierścieni po lewej stronie. Obracając pokrętkę cały czas w tę samą stronę przesunąć nić pajęczą na  $(m - 10)$ -ty pierścień po prawej stronie. Poczynając od  $(m - 9)$ -tego odczytywać położenia kolejnych pierścieni aż do  $m$ -tego (po prawej stronie).
- Wyniki zapisać w Tabeli I i policzyć promień  $r_m$  pomierzonych pierścieni. Następnie sporządzić wykres  $r_m^2$  w funkcji  $m$ . Powinna to być prosta typu  $y = ax + b$ .
- Obliczyć współczynnik nachylenia  $a$  prostej oraz niepewność  $\Delta a$  jego wyznaczenia metodą najmniejszych kwadratów (wykorzystując np. funkcję REGLINP programu Excel) lub graficznie.
- Obliczyć ze wzoru (6) promień  $R$  soczewki pomiarowej.
- Obliczyć niepewność  $\Delta R$  pomiaru promienia krzywizny soczewki. Ponieważ wartość  $\lambda$  znana jest dokładnie (jest odczytana z tablic), można przyjąć, że

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

- W przypadku, gdy drugi parametr  $b$  prostej jest różny od zera (linia prosta przerywana na rysunku 5) wyjaśnić co mogło być tego przyczyną.

Tabela I

lp.	rzęd pierścienia [m]	położenie lewe $d_l$ [mm]	położenie prawe $d_p$ [mm]	$r_m = (d_p - d_l)/2$ [mm]	$r_m^2$ [mm <sup>2</sup> ]
1	m				
2	m - 1				
3	m - 2				
4	m - 3				
5	m - 4				
6	m - 5				
7	m - 6				
8	m - 7				
9	m - 8				
10	m - 9				