DYFRAKCJA I INTERFERENCJA NA ŚWIETLE LASEROWYM

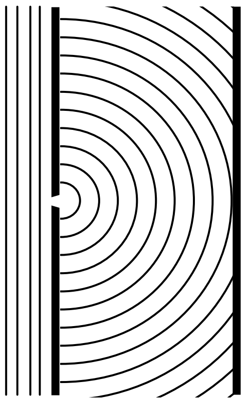
Instrukcja dla uczniów szkół ponadpodstawowych

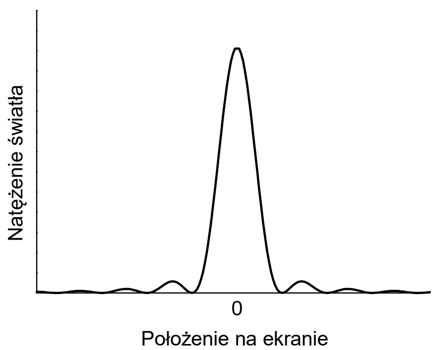
Fotony, jak zresztą i inne obiekty, mają bardzo specyficzną cechę – w pewnych sytuacjach zachowują się jak cząstki, a w pewnych jak fala. Ta zadziwiająca cecha światła nosi nazwę DUALIZMU KORPUSKULARNO-FALOWEGO. Istnieje wiele doświadczeń potwierdzających, że światło zachowuje się jak zbiór cząstek (fotonów) np. zjawisko fotoelektryczne, efekt Comptona. Podobnie istnieje wiele doświadczeń potwierdzających, że światło jest falą elektromagnetyczną. Należą do nich np. zjawiska dyfrakcji i interferencji światła, których badanie jest celem tego ćwiczenia.

Dyfrakcja to zjawisko fizyczne zmiany kierunku rozchodzenia się fali na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu.

Interferencja to zjawisko nakładania się fal prowadzące do zwiększania lub zmniejszania amplitudy fali wypadkowej.

Jednym z najprostszych przykładów zjawiska dyfrakcji jest przejście równoległej wiązki światła laserowego przez wąską pojedynczą szczelinę o szerokości *d*. Zgodnie z zasadą Huygensa każdy punkt szczeliny, jest nowym źródłem fali. Między źródłami zachodzi interferencja, co powoduje wzmacnianie i osłabianie światła rozchodzącego się w różnych kierunkach. Tak więc na ekranie widoczna będzie seria minimów i maksimów światła laserowego.





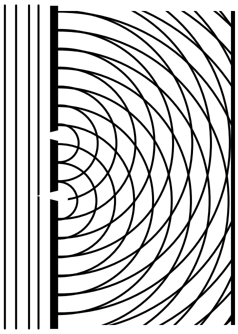
Odległość poszczególnych minimów od siebie zależy od szerokości szczeliny (d) oraz od długości fali światła laserowego (λ). Kąt pod którym widoczne są kolejne minima obrazu dyfrakcyjnego (a_n) wyraża się wzorem:

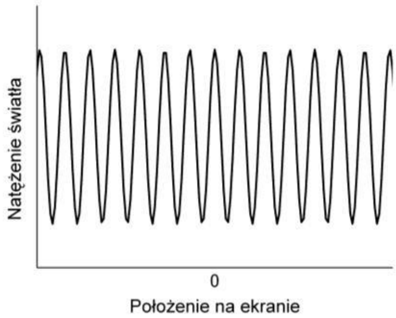
$$\sin a_n = n\,\frac{\lambda}{d}\,,$$

gdzie n jest numerem kolejnego minimum licząc od środka prążka centralnego. Zakładając, że obraz obserwujemy tylko dla małych kątów, na prostopadłym do wiązki laserowej ekranie, oddalonym od szczeliny o odległość L (wówczas można przyjąć, że $\sin\alpha \cong \tan\alpha = H/L$), gdzie H_n jest odległością od centrum ekranu, można pokazać zależność położenia minimum na ekranie od szerokości szczeliny i długości fali światła laserowego ma postać:

$$H_n = n\frac{\lambda}{d}L\,. \qquad (1)$$

W przypadku przechodzenia światła laserowego przez dwie szczeliny odległe od siebie o odległość D (doświadczenie Younga), dodatkowo następuje interferencja fal pochodzących od każdej z fal z osobna. Na skutek tego na ekranie tworzą się prążki interferencyjne. W przypadku gdy szerokość szczelin jest dużo mniejsza niż odległość między nimi, obraz obserwowany na ekranie to seria równo odległych minimów i maksimów.





Odległość poszczególnych <u>maksimów</u> od siebie zależy od odległości pomiędzy szczelinami (D) oraz od długości fali światła laserowego (λ). Kąt pod którym widoczne są kolejne maksima obrazu dyfrakcyjno-interferencyjnego (α) wyraża się wzorem:

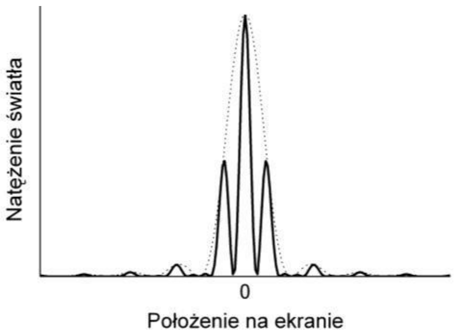
$$\sin a_n = n\frac{\lambda}{D},$$

gdzie n jest numerem kolejnego maksimum licząc od środka prążka centralnego.

Znowu zakładając, że obraz obserwujemy tylko dla małych kątów, na prostopadłym do wiązki laserowej ekranie, oddalonym od szczeliny o odległość L, można pokazać zależność położenia maksimum na ekranie (H_n) od odległości między szczelinami i długości fali światła laserowego:

$$H_n = n\frac{\lambda}{D}L\,. \tag{2}$$

W przypadku gdy szerokości szczelin są niezaniedbywane w stosunku do odległości pomiędzy nimi otrzymany obraz interferencyjny jest złożeniem obrazu powstałego od jednej szczeliny o szerokości d i obrazu pochodzącego od dwu szczelin odległych od siebie o odległość D.



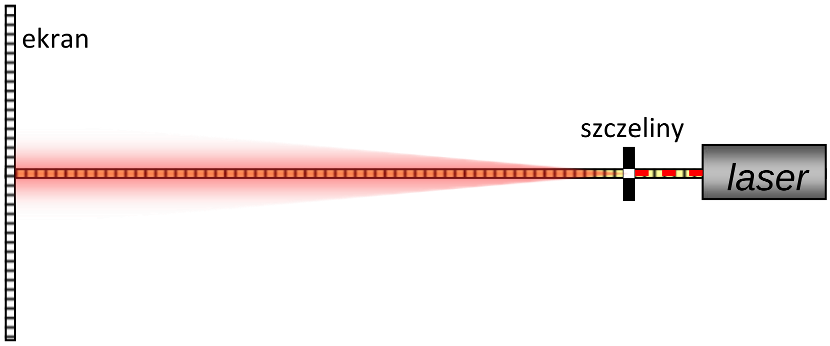
<u>Układ pomiarowy</u>

Do wykonania doświadczenia potrzebne będą:

- laser czerwony i zielony
- slajdy ze szczelinami
- układ dwóch szczelin
- ekran
- linijka
- papier milimetrowy

Projekt współfinansuje m.st. Warszawa

Poniższy rysunek prezentuje ustawienie poszczególnych elementów na ławie optycznej.



I. Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Na ławie optycznej umocuj laser czerwony (długość fali λ = 625 nm), szczelinę regulowaną oraz ekran. Zanotuj jaka jest odległość ekranu od szczeliny. Aby obserwowany obraz był jak najbardziej czytelny odległość ta powinna być w miarę możliwości jak największa.

L = …………………………………………..

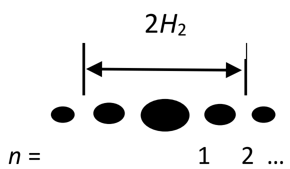
Ustaw wiązkę lasera, szczelinę oraz ekran w jednej osi. Wypróbuj slajdy o różnych szerokościach szczelin obserwując jak zmienia się obraz dyfrakcyjny. Przy zmniejszaniu szerokości szczeliny prążki się …………………………, natomiast przy zwiększaniu ………………………………… .

Wybierz slajd o takiej szerokości szczeliny, aby poszczególne prążki były czytelne i jednocześnie, żeby uzyskać ich w miarę dużo na ekranie. Zmierz odległość pomiędzy kolejnymi *n*-tymi minimami po obu stronach prążka centralnego. Odległość pomiędzy tymi minimami jest równa $2H_n$. Wyniki zapisz w tabeli.

n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]
1			
2			
3			

n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]
4			
5			
6			

Postaraj się oszacować jak dokładnie jesteś w stanie zmierzyć te odległości, czyli jaka jest niepewność pomiaru (ΔH_n).



Przykładowy pomiar odległości między minimami dla n =2.

Czy potrafisz bezpośrednio zmierzyć odległość n-tego prążka od środka ekranu?

Otrzymane wyniki przedstaw na wykresie w postaci zależności położenia minimum od jego numeru $H(n)$ i do zgromadzonych danych dopasuj prostą.

Otrzymany tangens kąta nachylenia dopasowanej prostej to zgodnie ze wzorem (1):

$$a = \frac{\lambda}{d} L = \text{……………………………….. .}$$

UWAGA! Zwróć uwagę na krotności jednostek metra, w których mierzysz i wstawiasz poszczególne dane!!!

Stąd obliczona szerokość szczeliny wynosi d = …………….

Jak ci się wydaje, dlaczego metoda dopasowywania prostej jest lepsza niż obliczanie wyniku z każdego pomiaru?

Zamień laser na zielony, a następnie powtórz doświadczenie dla tej samej szczeliny. Tym razem wyznacz długość fali lasera zielonego.

n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]	n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]
1				4			
2				5			
3				6			

Otrzymany tangens kąta nachylenia dopasowanej prostej to zgodnie ze wzorem (1)

$$a = \frac{\lambda}{d} L = \text{…………………………………..}$$

Stąd otrzymana długość fali światła laserowego wynosi λ = ………………………

Czy otrzymana długość fali rzeczywiście odpowiada barwie zielonej? Jakim długościom fali odpowiadają granice światła widzialnego?

II. Dyfrakcja i interferencja na dwóch szczelinach

Na ławie optycznej umocuj laser czerwony lub zielony, slajd z dwoma szczelinami oraz ekran. Ustaw wiązkę lasera, szczeliny oraz ekran w jednej osi. Zanotuj jaka jest odległość ekranu od szczeliny. Aby obserwowany obraz był jak najbardziej czytelny odległość ta powinna być w miarę możliwości jak największa.

L = …………………………………………..

Zmierz odległość pomiędzy kolejnymi n-tymi maksimami po obu stronach prążka centralnego. Odległość pomiędzy tymi maksimami jest równa $2H_n$. Wyniki zapisz w poniższej tabeli. Otrzymane wyniki przedstaw na wykresie w postaci zależności położenia maksimum od jego numeru $H(n)$ i do zgromadzonych danych dopasuj prostą.

n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]
1			
2			
3			

n	$2H_n$ [ ]	H_n [ ]	ΔH_n [ ]
4			
5			
6			

Otrzymany tangens kąta nachylenia dopasowanej prostej to zgodnie ze wzorem (2)

$$a = \frac{\lambda}{D} L = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

Stąd otrzymana odległość między szczelinami wynosi D = …………………………………….
Czy otrzymane wyniki różnią się od oczekiwanych rezultatów?

O niepewnościach pomiarowych słów kilka

Zastanówmy się chwilę nad tym dlaczego wyznaczone wartości d, λ, D mogą nieco różnić się od rzeczywistych. Dzieje się tak, ponieważ zwykle nie jesteśmy w stanie prowadzić pomiarów z dowolną dokładnością. Jeśli zmierzone wartości są obarczone niepewnością, również wielkości obliczone na ich podstawie będą wykazywały niepewność.

Niepewność pomiarową można wyrazić jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności składowych.

Aby wyznaczyć d w części I. tego ćwiczenia potrzebowaliśmy wzoru: $d = \frac{\lambda L}{a}$. Zakładając, że długość fali lasera możemy uznać za dokładną, niepewność wyznaczenia d możemy przyjąć równą:

$$u_d = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

gdzie u_1 odpowiada niepewności wyznaczenia szerokości szczeliny wynikającej z niepewności pomiaru L, natomiast u_2 odpowiada niepewności wyznaczenia szerokości szczeliny wynikającej z niepewności wyznaczenia a. Niepewności te wyrażają się następującymi wzorami:

$$u_1 = \frac{1}{2}\left|d|_{L+u_L} - d|_{L-u_L}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{\lambda(L+u_L)}{a} - \frac{\lambda(L-u_L)}{a}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{\lambda \cdot 2u_L}{a}\right| = \frac{\lambda \cdot u_L}{a} = \frac{\lambda L}{a} \cdot \frac{u_L}{L} = d \cdot \frac{u_L}{L}$$

$$u_2 = \frac{1}{2}\left|d|_{a+u_a} - d|_{a-u_a}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{\lambda L}{a+u_a} - \frac{\lambda L}{a-u_a}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{\lambda L[(a-u_a) - (a+u_a)]}{(a+u_a)(a-u_a)}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{\lambda L(-2u_a)}{a^2 - u_a^2}\right| \xrightarrow{u_a \ll a} \frac{1}{2}\frac{2\lambda L u_a}{a^2} = \frac{\lambda L}{a} \cdot \frac{u_a}{a} = d \cdot \frac{u_a}{a}$$

W związku z tym

$$u_d = d\sqrt{\left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{a}\right)^2}$$

Jako niepewność pomiaru odległości u_L możemy przyjąć najmniejszą podziałkę na miarce, a niepewność współczynnika kierunkowego prostej u_a musisz oszacować z wykonanego wykresu. Pomoże Ci w tym zaznaczenie na wykresach niepewności pomiarowych u_{H_n}.. Która z tych wielkości ma decydujący wpływ na ostateczną niepewność wyznaczenia szerokości szczeliny?

Policz niepewność wyznaczonej w twoim doświadczeniu szerokości szczeliny. Wynik zapisz poniżej.

d ± u_d = ………….. ± ……………………..

Sprawdź szerokość szczeliny używanej w eksperymencie. Czy uzyskałeś poprawny wynik?

W przypadku wyznaczenia długości fali jej niepewność można wyznaczyć w podobny sposób jako:

$$u_\lambda = \lambda\sqrt{\left(\frac{u_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{d}\right)^2}$$

Oblicz niepewność wyznaczonej w twoim doświadczeniu długości fali światła zielonego i zapisz go poniżej.

λ ± u_λ = ………….. ± ……………………..

Wiedząc, że długość fali lasera zielonego to λ = 532 cm używanego w eksperymencie możesz teraz stwierdzić czy uzyskałeś poprawny wynik?

Na koniec, korzystając ze wzoru:

$$u_D = D\sqrt{\left(\frac{u_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_a}{a}\right)^2}$$

oblicz również niepewność wyznaczenia D odległości między szczelinami w części II ćwiczenia. W przypadku gdy korzystałeś z lasera czerwonego możesz przyjąć, że jego długość fali jest znana dokładnie i $u_\lambda = 0$. Wynik zapisz poniżej:

$\frac{\Delta D}{D}$ =…………………………., czyli $D \pm u_D$ = ………….. ± ……………………..

Ponownie porównaj uzyskany wynika z wartością oczekiwaną.

Czy uzyskane niepewności są dla Ciebie satysfakcjonujące? Co byłoby potrzebne aby zmniejszyć niepewności pomiarowe w tych eksperymentach?

Opracowanie:
M. Grzybowski, A. Drabińska