



ĆWICZENIE	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
19	Mikrofalowy interferometr Michelsona

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie falowych właściwości promieniowania mikrofalowego, w szczególności zjawisk takich jak dyfrakcja oraz interferencja destruktywna i konstruktywna. Wykonane pomiary pozwalają dodatkowo na wyznaczenie długości fali mierzonego promieniowania przy pomocy tzw. interferometru Michelsona.

2. Układ doświadczalny

W skład układu doświadczalnego (rys. 1) wchodzi:

- generator mikrofal,
- detektor mikrofal,
- płytkę częściowo przepuszczającą mikrofałe (wykonana z drewna),
- dwie płytki odbijające mikrofałe (wykonane z metalu),
- miarka ze skalą centymetrową.

3. Wstęp teoretyczny

1. Fale i ich interferencja

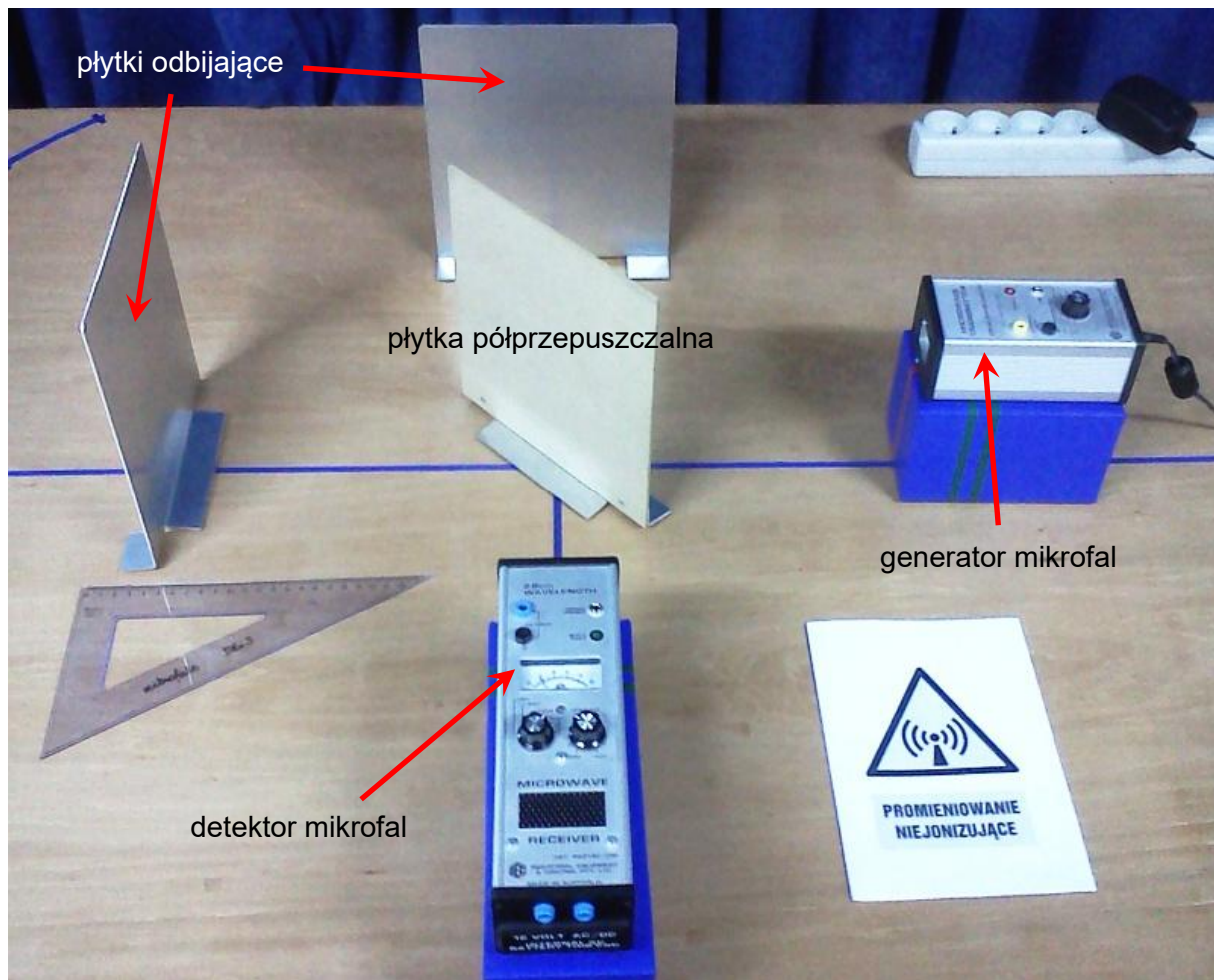
Ruch falowy to rozchodzenie się (w czasie lub przestrzeni) powtarzającej się (rytmicznej, pulsującej, periodycznej) zmiany pewnej wielkości. Tą wielkością może być np. odchylenie poziomu wody w danym punkcie od pewnej powierzchni – tak rozchodzą się fale na powierzchni wody. Może to być także natężenie pola elektrycznego i magnetycznego, które rozchodząc się wspólnie w przestrzeni tworzą *falę elektromagnetyczną*. Maksymalna wartość tego odchylenia to *amplituda fali*, natomiast *faza* opisuje zmiany tego odchylenia w czasie lub przestrzeni.

Fale można opisać przy pomocy kilku parametrów. *Długość fali* (zwykle oznaczana literą λ) to najmniejsza odległość punktów o jednakowej fazie, czyli mających tę samą wartość i podlegających takim samym zmianom. *Czoło fali* (lub inaczej *front falowy*) to powierzchnia łącząca punkty o jednakowej fazie, a *kierunek rozchodzenia się* fali wyznacza linia prosta prostopadła (a właściwie: normalna) do powierzchni czoła fali. *Okres zmienności* fali (oznaczany zwykle literą T) to czas, po którym następuje powrót do tej samej fazy, zaś *częstotliwość* fali (oznaczana czasem literą f) to jego odwrotność:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Jeśli znana jest prędkość fali (a w przypadku fal elektromagnetycznych w próżni jest to prędkość światła $c = 3 \cdot 10^8$ m/s), to łatwo obliczyć, że jeśli długość fali wynosi:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (2)$$



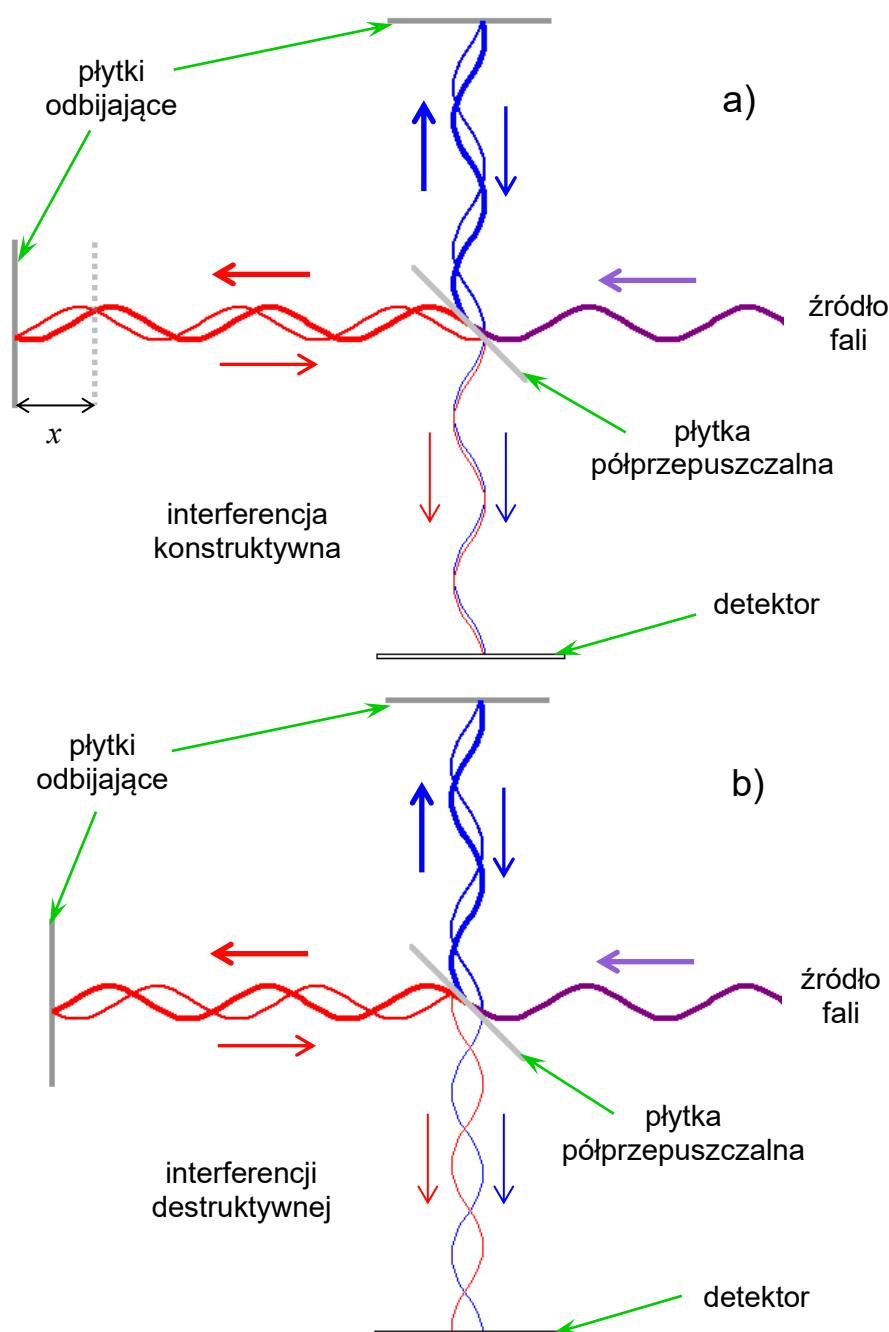
Rys. 1. Widok ogólny układu pomiarowego.

Gdy w jakimś miejscu spotkają się dwie lub więcej fal, zachodzi ich *interferencja*, polegająca na nakładaniu się na siebie ich amplitud. W efekcie wypadkowa amplituda jest sumą amplitud wszystkich interferujących fal, co może prowadzić do powstania nowego czoła fali o innym kształcie. Dość wygodnie opisuje to tzw. *zasada Huygensa* (czyt.: „*hojchensa*”), którą sformułował w 1678 r. holenderski uczony Christiaan Huygens. Zasada ta mówi, że każdy punkt ośrodka, do którego dotarło czoło fali, można uważać za źródło nowej fali kulistej. Pozwala ona wyjaśnić wiele zjawisk falowych (takich jak odbicie fali na granicy dwóch ośrodków, załamanie fali przy przejściu do ośrodka o innej prędkości rozchodzenia się fal czy ugięcie fal na przeszkodzie), ale nie określa wprost amplitudy fali. Pozwala natomiast określić kierunek rozchodzenia się fal.

2. Interferometr Michelsona

Interferometrem nazywa się ogólności urządzenie pomiarowe oparte na zjawisku interferencji fal. Istnieje szereg różnych interferometrów, które mogą służyć do różnych precyzyjnych pomiarów, jak np. badanie niewielkich nierówności na płaskiej powierzchni czy pomiar prędkości obrotu. Omawiany w ćwiczeniu interferometr został skonstruowany przez Alberta Abrahama Michelsona w celu zmierzenia, jaki wpływ na prędkość światła ma ruch Ziemi po orbicie wokół Słońca oraz jej obrót wokół własnej osi. Eksperyment przy użyciu swego interferometru Michelson przeprowadził wraz z Edwardem Morleyem w 1887 roku. Okazało się, że prędkość światła nie zależy od ruchu Ziemi (ani w ogóle od żadnego innego ruchu), co pozwoliło odrzucić teorię eteru kosmicznego jako nośnika fal elektromagnetycznych i rozwinąć się teorii względności Einsteina.

W swojej koncepcji interferometr Michelsona składa się ze źródła fali o określonej długości (np. światła monochromatycznego), detektora (np. ekranu), jednej płytki półprzepuszczalnej i dwóch całkowicie odbijających falę (np. luster). Fala przelatując przez płytkę półprzepuszczalną zostaje rozdzielona na dwie spójne wiązki poruszające się względem siebie pod kątem prostym. Następnie obie wiązki trafiają do dwóch płytek odbijających i wracają do płytki półprzepuszczalnej, gdzie łączą się z powrotem i trafiają do detektora. Ponieważ każda z wiązek przebywa inną drogę, są przesunięte względem siebie w fazie, co oznacza, że ich interferencja może być zarówno konstruktywna, jak i destruktywna. To, czy nastąpi wzmocnienie, czy wygaszenie fali, zależy głównie od położenia płytek. Ilustruje to rysunek 2.



Rys. 2. Schemat działania interferometru Michelsona podczas:
a) interferencji konstruktywnej, b) interferencji destruktywnej.

Warto tu zwrócić uwagę, że cały czas mowa o tzw. *drodze optycznej*. Wynika to z tego, że długość fali w danym miejscu zależy zarówno od jej częstotliwości, jak i prędkości, więc jeśli na drodze pomiędzy płytkami fala zmieni swą prędkość, interferencja będzie zachodziła w inny sposób – taka była idea pomiaru zmian prędkości światła przez panów Michelsona i Morleya. Droga optyczna, w przeciwieństwie do drogi geometrycznej, uwzględnia te zmiany prędkości fali (czyli np. współczynnik załamania światła w gorącym powietrzu, wodzie lub innym materiale) i bardziej odpowiada temu, co nazywa się fazą fali. W warunkach, gdy prędkość fali w każdym miejscu interferometru Michelsona pozostaje taka sama, można przyjąć, że obie drogi są sobie równe.

3. Hipoteza

W interferometrze Michelsona każda z rozdzielonych fal przebywa drogę pomiędzy płytką półprzepuszczalną a odbijającą dwukrotnie, zanim złączą się z powrotem i interferują. Można z tego wywnioskować, że przesunięcie jednej z płytek odbijających o x skutkuje zmianą drogi przebytej przez tę konkretną falę o $2x$. Jeśli druga płytka odbijająca w tym samym czasie nie była przesuwana, to różnica dróg optycznych przebytych przez obie fale zmieni się właśnie o $2x$.

Interferencja konstruktywna obu tych fal możliwa jest wtedy, gdy są one zgodne w fazie, a ta zmienia się cyklicznie. Jeśli zatem przesuniemy jedną z płytek odbijających tak, że jedna z fal przebędzie drogę dłuższą lub krótszą o długość fali λ , to jej faza będzie taka sama i znowu nastąpi interferencja konstruktywna. Podobnie będzie, gdy fala przebędzie drogę dłuższą lub krótszą o 2λ , o 3λ itd. Porównując to z ustaleniami z wcześniejszego akapitu można zapisać to w postaci równania:

$$2x = n\lambda \quad (3)$$

gdzie n to dowolna liczba całkowita. (Można tutaj założyć, że wartości ujemne x i n odpowiadają skróceniu drogi optycznej, dodatnie – jej wydłużeniu, zaś zerowe – pierwotny stan interferencji.)

Efektom interferencji fal jest sygnał o odpowiednim natężeniu w detektorze. Gdy interferencja jest konstruktywna, sygnał ten osiąga maksimum, więc można stosunkowo łatwo wyznaczyć takie położenia płytek odbijających, w których dochodzi do takiej interferencji. Następnie przesuwając jedną z płytek można wyznaczyć odległość x , która odpowiada n -krotnemu maksimum sygnału. Podstawiając zmierzone wartości x i n do równania (3) można zatem obliczyć, jaka jest długość fali λ .

4. Przebieg doświadczenia

⚠️ Uwaga! Długotrwale działanie mikrofal o dużym natężeniu może powodować podgrzewanie ciała ludzkiego. Nie wolno kierować źródła mikrofal bezpośrednio na ciało z odległości mniejszej niż 20 cm! Należy również unikać niepotrzebnej pracy źródła mikrofal.

A) Ustawić na stole źródło i detektor mikrofal (wraz z podstawkami) oraz płytki (odbijające i półprzepuszczalną) zgodnie ze schematem interferometru Michelsona. Odległość pomiędzy poszczególnymi elementami układu powinna wynosić przynajmniej 20 cm.

B) Uruchomić odbiornik mikrofal (detektor) zgodnie z dołączonym do stanowiska opisem. W razie wątpliwości poprosić o pomoc obsługę laboratorium.

C) Uruchomić generator mikrofal (źródło fali) w trybie modulacji dźwiękowej. Ustawienie modulacji sygnału mikrofalowego na częstotliwość z zakresu słyszalnego dla człowieka umożliwia usłyszenie zmian natężenia mikrofal jako zmian natężenia dźwięku.

D) Przesuwając płytki odbijające mikrofały znaleźć takie ich położenie, w którym natężenie fali w detektorze osiąga maksimum. W razie potrzeby wyregulować czułość detektora oraz głośność sygnału dźwiękowego tak, by był słyszalny, ale nie uciążliwy.

- E)** Przy pomocy miarki z podziałką centymetrową wyznaczyć początkową odległość jednej z płytek odbijających od wybranego punktu na drodze wiązki mikrofal, które do niej docierają. (Może to być np. odległość od tego punktu płytki półprzepuszczalnej, w którym rozdzielają się wiązki mikrofal. Punktem odniesienia może także być aktualne położenie płytki i wtedy początkowa odległość będzie równa zero).
- F)** Przesuwając płytkę odbijającą sprawdzić, o jaką odległość x należy ją przesunąć, by osiągnąć pierwsze ($n=1$) kolejne maksimum natężenia fal w detektorze. Na podstawie równania (3) obliczyć długość fali λ .
- G)** Oszacować niepewność zmierzonej w ten sposób odległości x oraz niepewność obliczonej długości fali λ .
- H)** W taki sam sposób wykonać pomiary i oszacować niepewności dla drugiego, trzeciego, piątego, dziesiątego i dwudziestego kolejnego maksimum (co odpowiada wartościom n równym kolejno 2, 3, 5, 10 i 20). Który z tych wyników jest najdokładniejszy? Jakie trudności wiążą się z wykonaniem pomiarów dla tych wartości n ? Który pomiar można uznać za optymalny?
- I)** Po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie generatora i odbiornika mikrofal.
- J)** Porównać wyniki pomiarów z wartością λ odczytaną z dokumentacji układu pomiarowego. Jakie wnioski można wyciągnąć z tego porównania?