



Szkoła z przyszłością

szkolenie współfinansowane przez Unię Europejską
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



Narodowe Centrum Badań Jądrowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

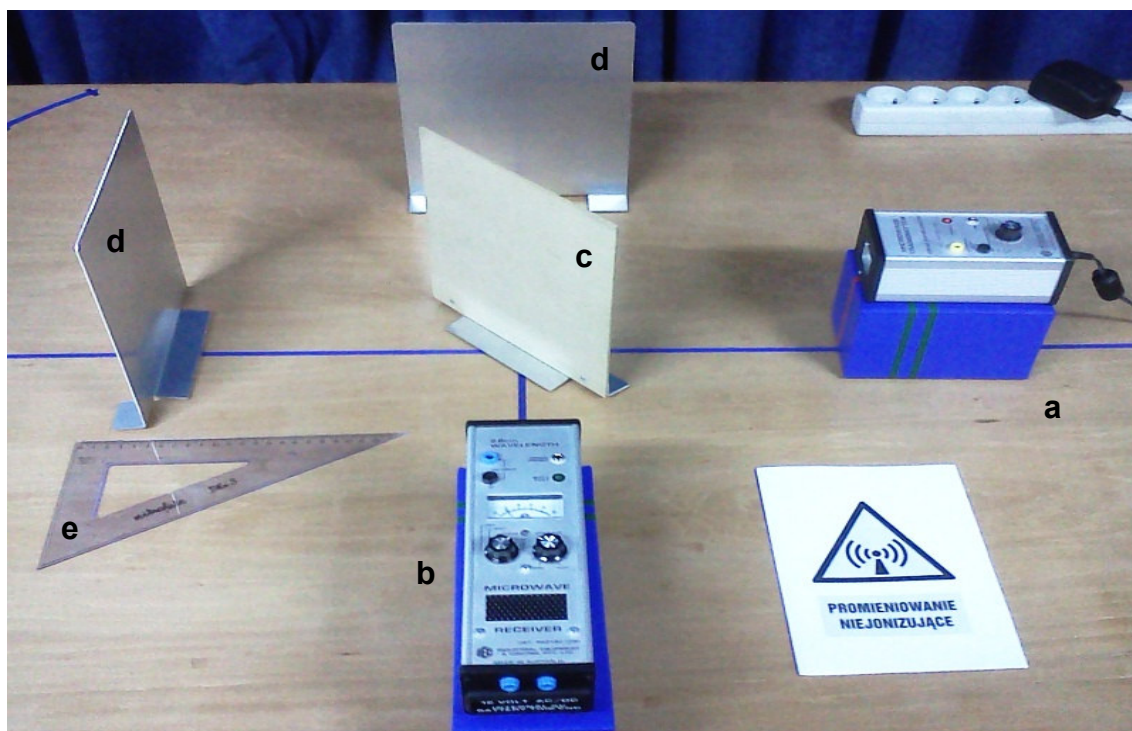
ĆWICZENIE	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ
23a	Mikrofalowy interferometr Michelsona
Data pomiaru:	
Imię i nazwisko:	
Imię i nazwisko:	

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

Aparatura używana w ćwiczeniu składa się z generatora mikrofal, detektora mikrofal wyposażonego w dwie sondy diodowe: wbudowaną oraz zewnętrzną, a także zestawu różnych przesłon odbijających lub częściowo przepuszczających promieniowanie mikrofalowe (rys. 1).



Rys. 1. Aparatura do badania interferencji mikrofal (a - generator mikrofal, b - detektor mikrofal, c - przesłona półprzepuszczalna, d - przesłony odbijające, e - miarka)

3. WSTĘP TEORETYCZNY

1. Mikrofałe jako rodzaj promieniowania elektromagnetycznego

Promieniowaniem mikrofalowym nazywa się promieniowanie elektromagnetyczne o zakresie częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz, co odpowiada długościom fali od ok. 1 metra do ok. 1 milimetra. Pod względem swej natury jest to taki sam rodzaj promieniowania jak fale radiowe, podczerwień, światło widzialne, nadfiolet, czy wreszcie promieniowanie rentgenowskie i γ . Zwykle granice pomiędzy wymienionymi rodzajami promieniowania są dość płynne, ale to, co wyróżnia mikrofałe, to właśnie długość porównywalna z rozmiarami obiektów, z jakimi spotykamy się w życiu codziennym. Stąd zastosowanie mikrofal w radarach, służących do wykrywania obiektów o takich rozmiarach.

Wyróżnia się kilka szczególnych zjawisk, jakim podlegają fale (w tym fale elektromagnetyczne, a więc także mikrofałe). Są to m.in. odbicie, załamanie, dyfrakcja, interferencja (konstruktywna i destruktywna), oraz polaryzacja (liniowa lub kołowa). Ta ostatnia dotyczy właściwie tylko fal poprzecznych, ale wszystkie fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi, zatem bezsprzecznie powinna znaleźć się na tej liście.

Odbicie i załamanie można analizować całkowicie geometrycznie, jak w przypadku optycznego opisu zachowania się promieni światła widzialnego, ale dyfrakcja i interferencja wymagają już dokładniejszego opisu uwzględniającego wielkości typowe dla fal. Takimi wielkościami są *amplituda* A , *prędkość fazowa* v (dla fal elektromagnetycznych oznaczana zwykle literą c) czy też wspomniana wcześniej *częstotliwość* ν . Z dwiema ostatnimi związane są *długość fali* λ oraz *okres drgań fali* T , zaś amplituda pokazuje, jak duże są „wychylenia” tej wielkości, która „faluje” (w przypadku fal dźwiękowych jest to ciśnienie, a w przypadku fal elektromagnetycznych – np. natężenie pola elektrycznego). Mówiąc o prędkości fazowej należy wspomnieć też o *fazie fali* (φ), która mówi, na jakim etapie „wychylania” jest fala w danym miejscu i danej chwili. Faza zmienia się w czasie i w przestrzeni, stąd często mówi się o *różnicy faz* ($\Delta\varphi$).

Dyfrakcja to zjawisko polegające na zmianie kierunku rozchodzenia się fali w momencie, gdy napotka ona na przeszkodę. Wygodnie jest opisać je używając tzw. *zasady Huygensa*, zgodnie z którą wszystkie punkty czoła fali same są źródłami nowych fal kulistych zgodnych w fazie z falą pierwotną. Gdy fala płaska nie napotyka żadnych przeszkód, te teoretyczne kuliste fale nakładają się tak, że zostaje zachowany płaski kształt tzw. *frontu falowego* (czyli linii utworzonej przez punkty o zgodnej fazie). W obecności przeszkód część z tych fal kulistych zostaje wygaszona, przez co zachowanie całego frontu falowego znacznie się komplikuje. Inaczej zachodzi dyfrakcja na krawędzi przeszkody, inaczej na przeszkodzie o małym rozmiarze, a jeszcze inaczej na niewielkiej szczelinie.

Silnie związana z dyfrakcją jest interferencja, czyli nakładanie się fal (w tym także kulistych fal Huygensa). Załóżmy, że omawiane są dwie fale jest sinusoidalne o tej samej amplitudzie A , pochodzące ze spójnych źródeł (czyli będące na początku w tej samej fazie oraz mające takie same okres $T = 1/\nu$ i długość λ). Takie fale opisane są wzorami:

$$\begin{aligned} y_1(t, r_1) &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) \\ y_2(t, r_2) &= A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie y to miara wielkości charakteryzującej falę (np. natężenie pola elektrycznego bądź wychylenie powierzchni wody z położenia równowagi), natomiast r_1 i r_2 to odległości tych źródeł od punktu, w którym dokonujemy pomiaru. W punkcie pomiaru wypadkowe chwilowe wychylenie wynosi:

$$\begin{aligned} y(t, r_1, r_2) &= y_1(t, r_1) + y_2(t, r_2) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) + A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) = \\ &= 2A \sin \pi \left(\frac{2t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \cos \pi \left(\frac{r_2}{\lambda} - \frac{r_1}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Warto zwrócić uwagę, że kosinus nie jest zależny od czasu, a tylko od położenia, z czego łatwo wywnioskować, że całość będzie miała wartości najbardziej oddalone od zera dla $r_2 - r_1 = n\lambda$ i zawsze równe zeru dla $r_2 - r_1 = (n + \frac{1}{2})\lambda$, gdzie n oznacza dowolną liczbę całkowitą. Innymi słowy jeśli różnica dróg przebytych przez obie fale będzie wielokrotnością długości fali, to będzie następowała

interferencja konstruktywna (wzmacnianie fal), a jeśli wielokrotnością powiększoną o pół długości fali, to nastąpi *interferencja destruktywna* (wzajemne wygaszanie się fal).

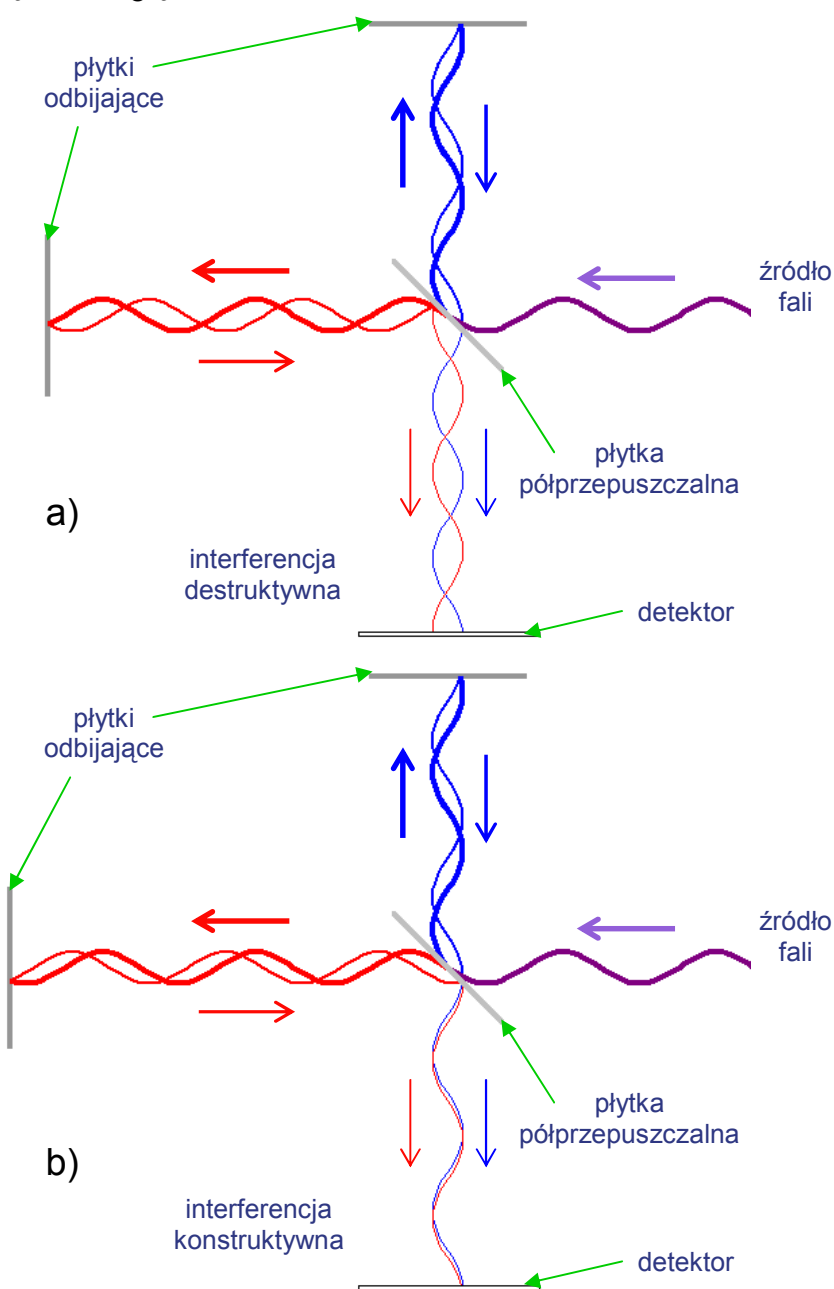
Oczywiście rzadko zdarza się, by dwie dochodzące do jednego punktu fale miały identyczną amplitudę, ale niezależnienie amplitud w powyższych równaniach komplikuje tylko obliczenia matematyczne, nie zmienia natomiast słuszności wniosków.

2. Interferometr Michelsona

Interferometr jest w ogólności urządzeniem pomiarowym opartym 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 rozseparowana 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.

Ponieważ każda z rozdzielonych fal przebywa drogę pomiędzy płytką półprzepuszczalną a odbijającą dwukrotnie, nim złączą się z powrotem i interferują, to przesunięcie jednej z płytek odbijających o x skutkuje zmianą drogi przebytej przez tę falę o $2x$. W ten sposób można łatwo regulować różnicę dróg przebytych przez obie wiązki. Dokładny rachunek tych dróg ilustruje rys. 3, przy czym warto zwrócić uwagę, że cały czas mowa tu o tzw. *drodze optycznej*. Wynika to z tego, że długość fali w danym miejscu zależy zarówno od jej częstotliwości, jak i prędkości,



Rys. 2. Schemat działania interferometru Michelsona

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.

Zgodnie z rys. 3 droga, jaką od źródła do detektora przebywa fala odbita przez płytkę półprzepuszczalną, wynosi $r_1' = L_1 + L_2 + L_2 + L_4$. Natomiast droga, jaką przebywa fala początkowo przenikająca przez płytkę półprzepuszczalną, wynosi $r_2' = L_1 + L_3 + L_3 + L_4$. W związku z tym warunek wzmocnienia się fal wynosi w takim wypadku $r_2' - r_1' = 2L_3 - 2L_2 = n'\lambda$. Jeśli przesunie się jedną z płytek o odległość x , to różnica tych dróg wynosi $r_2'' - r_1'' = 2L_3 + 2x - 2L_2 = n''\lambda$. Odejmując oba te równania stronami otrzymamy warunek:

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

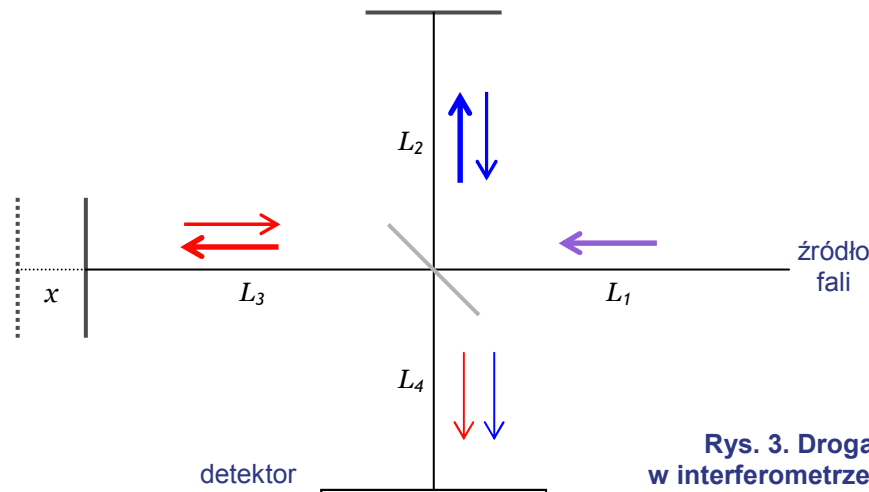
gdzie n' i n'' to liczby całkowite. Analogicznie dla wygaszania fal otrzymujemy to samo równanie:

$$2x = (n'' + \frac{1}{2} - (n' + \frac{1}{2}))\lambda = (n'' - n')\lambda \quad (4)$$

Różnica dwóch liczb całkowitych jest również liczbą całkowitą, więc ogólnie powyższy warunek można zapisać w postaci:

$$\lambda = \frac{2}{n} x \quad (5)$$

gdzie λ to długość fali, x to przesunięcie płytki odbijającej, a n to liczba cyklicznych zmian natężenia fali towarzysząca przesunięciu płytki o x . (Jeśli mierzona będzie odległość pomiędzy maksimami natężenia fali, to n będzie liczbą minimów pomiędzy tymi maksimami, zaś jeśli odległość między minimami – n będzie liczbą maksimów.)



Rys. 3. Droga różnych fal w interferometrze Michelsona

3. Zjawisko Dopplera

Kiedy źródło fali i jej odbiornik są w ruchu względem siebie, następuje różnica w częstotliwości fali nadawanej i odbieranej. Inny jest mechanizm tego zjawiska dla fal mechanicznych (np. dźwiękowych), a inny dla elektromagnetycznych (np. mikrofal i światła), jednak efekty podobne. Ponieważ w tym ćwiczeniu mowa jest wyłącznie o falach elektromagnetycznych, właściwy będzie wzór:

$$\nu_{\text{odbierana}} = \nu_{\text{nadawana}} \sqrt{\frac{1 - \frac{v_{\text{odbiornika}}}{c}}{1 + \frac{v_{\text{odbiornika}}}{c}}} \quad (6)$$

gdzie $\nu_{nadawana}$ to częstotliwość fali nadawanej przez źródło, $\nu_{odbierana}$ to częstotliwość fali odbieranej przez odbiornik, $\nu_{odbiornika}$ to prędkość odbiornika względem źródła, zaś c to prędkość światła.

Jeśli jedna z płytek odbijających falę w interferometrze Michelsona porusza się, to można ją uznać za odbiornik ruchomy względem źródła, do którego dociera fala o częstotliwości równej:

$$\nu_2 = \nu_1 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad (7)$$

gdzie ν_1 to częstotliwość źródła fali użytego w ćwiczeniu, zaś v to prędkość płytki. Ta sama płytka staje się jednocześnie źródłem fali odbitej o częstotliwości ν_2 , ale poruszającej się z prędkością v względem odbiornika. Wobec tego do odbiornika dociera fala o częstotliwości równej:

$$\nu_3 = \nu_2 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = \nu_1 \frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \quad (8)$$

Oczywiście jeśli prędkość v jest niewielka w porównaniu z prędkością światła w próżni, to i względna zmiana częstotliwości jest bardzo mała, niemniej może spowodować znaczące efekty. Może na przykład okazać się, że energia kwantu takiego promieniowania elektromagnetycznego (która jest przecież związana z częstotliwością) po odbiciu od ruchomej przeszkody zmieni się tak, że będzie wystarczająca, by wywołać jaką reakcję (np. jonizację), której inaczej by nie wywołała.

4. Dudnienie

Gdy interferują ze sobą dwie fale o różnych częstotliwościach ν_1 i ν_3 , ich wzajemne wzmacnianie i wygaszanie zmienia się w czasie. W zależności od tego, jak bardzo różnią się te częstotliwości, zmiany mogą być częstsze lub rzadsze. Jeśli do opisu obu fal użyjemy wzorów 1 uproszczonych o zależność od odległości (która nas nie interesuje), to obliczenia wyglądają następująco:

$$y_1(t) = A \sin 2\pi \frac{t}{T_1} = A \sin 2\pi \nu_1 t \quad (9)$$

$$y_3(t) = A \sin 2\pi \frac{t}{T_3} = A \sin 2\pi \nu_3 t$$

$$y(t) = y_1(t) + y_3(t) = A \sin 2\pi \nu_1 t + A \sin 2\pi \nu_3 t = 2A \sin 2\pi \frac{(\nu_1 + \nu_3)}{2} t \cdot \cos 2\pi \frac{(\nu_1 - \nu_3)}{2} t \quad (10)$$

Widać wyraźnie, że z nałożenia dwóch fal powstaje fala o częstotliwości $(\nu_1 + \nu_3)/2$ zmieniająca swe natężenie cyklicznie z częstotliwością $(\nu_1 - \nu_3)/2$. Oczywiście ta częstotliwość zmian natężenia nie może być mniejsza od zera, ale na potrzeby obliczeń można wybrać taki zapis, w którym $\nu_1 > \nu_3$. Ze względu na symetrię funkcji kosinus nie ma większego znaczenia, która częstotliwość jest większa – zjawisko zachodzi zawsze tak samo. Mówimy wtedy, że ta wypadkowa fala o uśrednionej częstotliwości „pulsuje” lub też (posługując się bardziej fachowym słownictwem), że mamy do czynienia z *dudnieniem*. Inaczej jest tylko w przypadku, gdy częstotliwości są dokładnie równe – wtedy dudnienie nie występuje, a amplituda fali jest maksymalna ($\cos 0 = 1$).

W szczególności częstotliwości ν_1 i ν_3 mogą być bardzo duże, tak jak to jest w przypadku mikrofal ($\nu \approx 10^{10}$ Hz) lub światła ($\nu \approx 5 \cdot 10^{14}$ Hz), natomiast różnice między nimi bardzo małe (rzędu nawet 1 Hz), a mimo to wykrywalne i mogące mieć znaczenie w procesach oddziaływania kwantów tak interferującego ze sobą promieniowania. Oznacza to jednocześnie, że można zmierzyć względną zmianę częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego nawet rzędu 10^{-15} ! Jeśli ta zmiana spowodowana jest efektem Dopplera, to można z podobną dokładnością zmierzyć prędkość poruszającego się źródła fali. Wprawdzie prędkość samej fali jest tutaj duża ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), ale samo źródło może poruszać się z prędkością rzędu 10^{-6} m/s (pojedyncze mikrometry na sekundę) i już ma to wpływ na interferencję!

4. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

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) Sprawdzić stan baterii w odbiorniku mikrofal, tj. ustawić lewe pokrętkę w pozycji „BATT.”. Powinna zaświecić się zielona dioda podpisana „BATT. TEST”- jeśli tak nie jest, należy poprosić o pomoc obsługę laboratorium.

C) Włączyć zasilanie detektora mikrofal, tj. ustawić lewe pokrętkę w pozycji „GAIN 1”, zaś prawe pokrętkę (regulujące głośność sygnału dźwiękowego, podpisane „VOLUME”) w połowie skali. Włączyć także zasilanie źródła mikrofal i ustawić dźwiękową modulację sygnału, tj. ustawić pokrętkę w pozycji „1kHz” lub „100Hz” (powinna zaświecić się czerwona dioda z podpisem „POWER”). Ustawienie modulacji sygnału mikrofalowego na częstotliwość z zakresu słyszalnego dla człowieka umożliwia usłyszenie zmian natężenia mikrofal jako zmian natężenia dźwięku.

D) Przesuwając jedną z płytek odbijających mikrofałę w kierunku równoległym do padania mikrofal znaleźć takie położenie, w którym natężenie fali w detektorze osiąga maksimum. W razie potrzeby wyregulować czułość detektora przełączając go na inny zakres wzmocnienia („GAIN 1”, „2”, „3” lub „4”) oraz wyregulować głośność sygnału dźwiękowego tak, by był słyszalny, ale nie uciążliwy.

E) Położyć obok jednej z płytek miarkę, tak, by zero na jej skali pokrywało się z położeniem tej płytki, a sama skala miarki była ułożona równolegle do kierunku padania mikrofal na tę płytkę.

F) Przesuwając płytkę równolegle do miarki notować w tabeli 1 odległości, w których w detektorze pojawiają się na przemian kolejne minima i maksima natężenia. Wykonać pomiary dla około 10 kolejnych par minimów i maksimów.

G) Wyłączyć zasilanie generatora i detektora, tj. przekręcić pokrętkę w pozycję „OFF”.

H) Uzupełnić tabelę 1 o różnice odległości pomiędzy sąsiadującymi ze sobą maksimami. Korzystając ze wzoru 5 obliczyć dla każdej takiej pary maksimów odpowiadającą jej długość fali (przyjmując $n = 1$). Obliczyć także różnicę odległości pomiędzy dwoma skrajnymi maksimami i odpowiadającą jej długość fali (przyjmując za n liczbę minimów pomiędzy tymi maksimami).

I) Wykonać takie same obliczenia jak w punkcie H, ale dla różnic pomiędzy minimami. Porównać wyniki otrzymane w obu punktach. Korzystając ze wzoru $c = \lambda \cdot \nu$ obliczyć częstotliwość mikrofal używanych w ćwiczeniu.

J) Obliczyć, z jaką prędkością musiałaby poruszać się płytka odbijająca fałę, by częstotliwość zmian natężenia fali w detektorze wynosiła 50 Hz, tzn. była z zakresu częstotliwości dobrze słyszalnych dla człowieka. Czy jest to prędkość, jaką można osiągnąć w warunkach laboratoryjnych?

K) Korzystając ze wzorów 8 i 10 obliczyć, z jaką prędkością musiałaby poruszać się płytka odbijająca fałę, by dudnienie fali wypadkowej w detektorze wynosiło 50 Hz.

L) Włączyć generator mikrofal w tryb pracy ciągłej przekręcając pokrętkę na pozycję „C.W.”. Włączyć detektor na uprzednio wybrany stopień wzmocnienia i maksimum głośności.

M) Spróbować energicznie poruszać jedną z płytek odbijających fałę w jedną i drugą stronę tak, by przekonać się, czy możliwe jest osiągnięcie takiej prędkości, przy której z głośnika detektora wydobywa się słyszalny dźwięk. UWAGA: w czasie poruszania płytką uważać, by nie uszkodzić żadnego z elementów układu pomiarowego!

N) Wyłączyć zasilanie generatora i detektora, tj. przekręcić pokrętkę w pozycję „OFF”.

ĆWICZENIE 23a	LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ Mikrofalowy interferometr Michelsona
Data pomiaru:.....	
Imię i nazwisko:.....	
Imię i nazwisko:.....	
Szkoła, klasa:.....	

TABELA 1

	x [cm]	λ [cm] między sąsiednimi minimami	λ [cm] między sąsiednimi maksimami
0. maksimum	$0 \pm$		
1. minimum	$\pm$		$\pm$
1. maksimum	$\pm$	$\pm$	
2. minimum	$\pm$		$\pm$
2. maksimum	$\pm$	$\pm$	
3. minimum	$\pm$		$\pm$
3. maksimum	$\pm$	$\pm$	
4. minimum	$\pm$		$\pm$
4. maksimum	$\pm$	$\pm$	
5. minimum	$\pm$		$\pm$
5. maksimum	$\pm$	$\pm$	
6. minimum	$\pm$		$\pm$
6. maksimum	$\pm$	$\pm$	
7. minimum	$\pm$		$\pm$
7. maksimum	$\pm$	$\pm$	
8. minimum	$\pm$		$\pm$
8. maksimum	$\pm$	$\pm$	
9. minimum	$\pm$		$\pm$
9. maksimum	$\pm$	$\pm$	
10. minimum	$\pm$		$\pm$
10. maksimum	$\pm$		
średnia λ [cm]		$\pm$	$\pm$
λ [cm] między skrajnymi minimami i maksimami		$\pm$	$\pm$