

Michelsonův experiment - Souboj přesnosti měření s kolemjedoucí tramvají

B. Moncořová¹ and E. Bednářová²

¹G Antona Bernoláka, Senec; babmon4@gmail.com

²G Otokara Březiny a SOŠ Telč; bednarovaeliska236@gmail.com

M. Svoboda, školitel; KF FJFI ČVUT

Abstrakt

V miniprojektu jsme složili interferometr, pomocí kterého jsme určili vlnovou délku laseru. Dále jsme sestavili, několik experimentů využívajícími difrakci a určili jsme šířku otvoru, kterým procházel paprsek laseru.

1 Úvod

Na konci 19. století se předpokládalo, že světlo, podobně jako zvuk, je mechanické vlnění šířící se látkou nazvanou éter. Jelikož má světlo vysokou rychlost, předpokládalo se, že tato látka má velice nízkou hustotu, je všudypřítomná a v prostotu vesmíru je nehybná. Pro důkaz éteru sestrojil v roce 1881 americký fyzik Albert Abraham Michelson experiment, který však přítomnost éteru vyvrátil. To otevřelo prostor pro nové teorie a vedlo k popsání obecné teorie relativity Albertem Einsteinem. Tato teorie předpověděla existenci gravitačních vln, k jejichž detekci se Michelsonův interferometr ve větším měřítku používá v současnosti. Gravitační vlny byly poprvé detekovány v roce 2015 na experimentu LIGO a za tento objev byla roku 2017 udělena Nobelova cena za fyziku.

Světlo je elektromagnetické záření a jednou z jeho vlastností je dualismus, což znamená, že má zároveň částicový i vlnový charakter. V experimentu se projevuje jeho vlnová povaha, což vede ke skládání vln (destruktivní a konstruktivní superpozice), které lze pozorovat v interferenčních maximech a minimech. Vlnovou povahu tedy lze dokázat pomocí tzv. interferenčních jevů, které dělíme na interferenci a difrakci. Interference je skládání vln z diskrétních bodových zdrojů, zatímco difrakce je skládání vln ze spojitě rozložených zdrojů.

Laser je optický zdroj elektromagnetického záření. Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku, je koherentní a monochromatické.

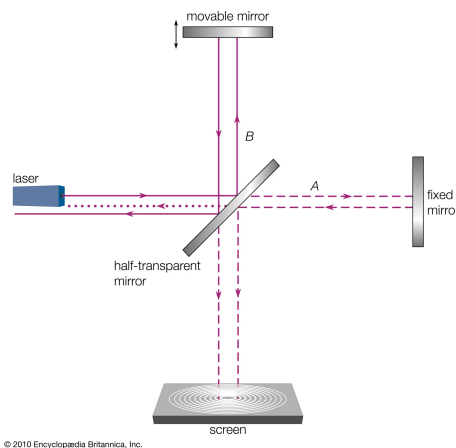
2 Michelsonův interferometr

Cílem bylo na základě korelace mezi změnou interferenčního obrazce a změnou délky dráhy paprsku vypočítat vlnovou délku laserového svazku a porovnat ji s hodnotou uvedenou výrobcem $\lambda = 633 \text{ nm}$. Pro experiment jsme použili laser, rozptylku, dvě zrcadla a polopropustnou skleněnou destičku, která musela být umístěna pod úhlem 45° (viz Obrázek 1). Výsledný interferenční obrazec jsme promítali skrze rozptylku na stínítko.

Při měření jsme měnili polohu jednoho ze zrcadel o hodnotu Δx , přičemž jsme počítali počet tranzicí interferenčních maxim. V případě Michelsonova interferometru je dráhový rozdíl Δl dvojnásobkem posunu zrcadla Δx . V případě maxim tedy platí pro vlnovou délku laseru vztah:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{n} = \frac{2\Delta x}{n},$$

kde n je počet tranzicí interferenčních maxim a λ je vlnová délka laseru.



Obrázek 1: Schéma Michelsonova interferometru. Převzato z [1].

Měření jsme provedli pro tři různé hodnoty Δx a pro každé Δx jsme provedli 10 měření, měli jsme tedy celkem 30 naměřených hodnot. Pro každé Δx jsme chybu odhadli na 10^{-3} mm a chybu Δn jsme odhadli pro každé Δx jinou ($\Delta x = 0,025$ mm - $\Delta n = 6$; $\Delta x = 0,01$ mm - $\Delta n = 3$; $\Delta x = 0,005$ mm - $\Delta n = 2$). Tyto chyby jsme poté zahrnuli do výpočtu výsledné chyby a výslednou hodnotu λ jsme vypočítali pomocí váženého průměru.

Výsledná hodnota nám vyšla $\lambda = (683 \pm 19)$ nm a hodnota uvedená výrobcem je $\lambda = 633$ nm.

3 Difrakce

Difrakci lze pozorovat na otvoru konečných rozměrů, kdy otvor již nelze aproximovat bodovým zdrojem, ale jedná se o nekonečné množství spojitě rozložených zdrojů. Na stínítku poté vzniká difrakční obrazec, ze kterého jsme určovali rozměry otvoru.

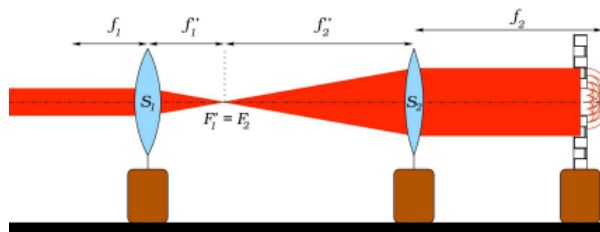
V experimentu jsme použili laser vyzařující na vlnové délce $\lambda = 633$ nm, jehož paprsek jsme pomocí Keplerova dalekohledu zúžili. Tento paprsek dále procházel otvorem a poté jsme ho pomocí 2 zrcadel nasměrovali na stěnu, která sloužila jako stínítko.

V experimentu jsme vždy měli vzdálenost minim (v případě mřížky jsme měřili maxima) a od středu obrazce. Pro velikost otvoru d poté platí:

$$d = \frac{m\lambda\sqrt{l^2 + a^2}}{a},$$

kde m je řád minima (kdy střed obrazce je nultého řádu), λ je vlnová délka laseru a l je vzdálenost od otvoru ke stínítku.

U každého měření jsme odhadli chyby, které jsme následně zahrnuli do výpočtu chyby výsledku a výslednou hodnotu d jsme spočítali pomocí váženého průměru.



Obrázek 2: Schéma průchodu paprsku Keplerovým dalekohledem. Převzato z [2]

3.1 Difrakce na mřížce

Optická mřížka je obvykle skleněná destička s nanesenou měkkou vrstvou, do níž jsou diamantem vyryty rovnoběžné vrypy o stejné šířce a stejné vzájemné vzdálenosti středů sousedních vrypů d (v našem případě 600 vrypů / mm).

Vzdálenost a jsme vždy měřili pro maximum 1. a 2. řádu pro 3 různé vzdálenosti l .

Chyby měření jsme odhadli na $\Delta l = 0,5$ cm, $\Delta a = 0,5$ cm.

Výsledná hodnota d nám vyšla $d = (1,5640 \pm 0,0013) \cdot 10^{-5}$ m. Hodnota uvedená výrobcem je $d = 1,6667 \cdot 10^{-5}$ m.

3.2 Difrakce na štěrbině

Pozorováním difrakčního obrazce jsme se snažili určit šířku štěrbinu a následně jsme ji porovnávali s šířkou, kterou jsme na štěrbině nastavili pomocí mikrometrického šroubu. Vzdálenost a jsme vždy měřili pro minimum 1., 2. a 3. řádu (kde to bylo možné) pro 6 různých velikostí štěrbinu.

Chybu měření jsme odhladli na $\Delta a = 0,5$ cm a vzdálenost l jsme určili $l = (10,31 \pm 0,05)$ m. Výsledné hodnoty d jsou v Tabulce 1.

d_m [m]	d_d [m]
0,00035	$0,00218 \pm 0,00012$
0,00050	$0,00332 \pm 0,00019$
0,00075	$0,00580 \pm 0,0005$
0,00085	$0,00640 \pm 0,0006$
0,00100	$0,00740 \pm 0,0008$
0,00125	$0,00883 \pm 0,00116$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty průměrů štěrbinu; d_m - hodnota z mikrometrického šroubu; d_d - hodnota získaná měřením pomocí difrakce.

3.3 Difrakce na kruhovém otvoru

Obdobně jako u štěrbinu, jsme se snažili měřením vzdálenosti minim od středu difrakčního obrazce určit průměr d otvoru, který jsme poté porovnávali s hodnotami změřenými mikroskopem.

Pro kruhový otvor je třeba do vztahu pro výpočet d dosazovat místo čísla řádu m , specifické hodnoty pro každý řád k_i . Platí $k_1 = 1,219$, $k_2 = 2,223$, $k_3 = 3,238$. Vzdálenost a jsme vždy měřili pro maximum 1., 2. a 3. řádu (kde to bylo možné) pro 2 různé velikosti

kruhového otvoru.

Chybu měření sme odhladli na $\Delta a = 0,5$ cm a vzdálenost l sme určili $l = (1031 \pm 5)$ cm. Výsledné hodnoty, jak z výpočtu z difrakce, tak z mikroskopu jsme porovnali s hodnotou uvedenou výrobcem:

	d_d [mm]	d_m [mm]	d_v [mm]
menší otvor	$0,95 \pm 0,17$	$0,68 \pm 0,13$	0,5
větší otvor	$1,4 \pm 0,3$	$1,13 \pm 0,13$	1,0

Tabulka 2: Naměřené hodnoty kruhového otvoru; d_d - průměr otvoru určený pomocí difrakce, d_m - průměr otvoru určený pomocí mikroskopu, d_v - průměr otvoru uvedený výrobcem.

4 Diskuse

U Michelsonova interferometru se naměřená hodnota λ v rámci chyby neshoduje s očekávanou hodnotou. To je nejspíš způsobeno rušením experimentu otřesy v místnosti (např. při průjezdu tramvají nebo chůzí), nejasným promítnutím obrazu na stěnu, což ztížilo počítání jednotlivých tranzitů, a nepřesným určením posunutí zrcadla v důsledku otáčení šroubu.

Výsledné hodnoty velikostí otvorů při difrakci se také neshodují s předpokládanou hodnotou, nejspíš v důsledku nepřesného měření vzdálenosti maxim. Zároveň obraz na stínítko nedopadal přesně kolmo. Přičemž nelze úplně přesně změřit vzdálenost jednotlivých minim, jelikož jednotlivé pruhy mají určitou tloušťku a my jsme jejich středy pouze odhadovali. K nepřesnosti mohl přispět i fakt, že jako stínítko jsme používali stěnu.

5 Shrnutí

V prvním experimentu jsme naměřili vlnovou délku laseru $\lambda = (683 \pm 19)$ nm. Pokus s difrakcí světla na optické mřížce nám přinesl hodnotu vzdálenosti jednotlivých vrypů $d = (1,5640 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-8})$ m.

Třetím pokusem jsme stanovili velikost štěrbin. Hodnoty jsou v Tabulce 1.

Během čtvrtého experimentu jsme získali velikosti průměrů kruhových otvorů, které jsou společně s hodnotami určenými pomocí mikroskopu uvedeny v Tabulce 2.

Odkazy

1. *The Editors of Encyclopaedia Britannica - Michelson interferometer*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.britannica.com/technology/Michelson-interferometer>. [cit. 2024-06-18].
2. *Kolektiv fyzikálního praktika - Mikrovlny*. Praha, 2024. Dostupné také z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/729876/mod_resource/content/6/mikrovlny_220404.pdf. [cit. 2024-06-18].