

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum III



Úloha č. 1

Název úlohy: Měření rychlosti světla Foucaultovou metodou

Jméno: Nikita Ustinov, Vojtěch Votruba

Datum měření: 2024-04-24

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

1. Najděte a prostudujte dostupnou literaturu týkající se měření rychlosti světla.
2. Popište a vysvětlete princip měření rychlosti světla metodou rotujícího zrcadla.
3. Sestavte aparaturu.
4. Změřte rychlost světla.

1 Teoretická část

Rychlost světla značená c je jednou ze základních přírodních konstant, a proto má mezi všemi fyzikálními konstantami jedno z nejdůležitějších postavení¹. V této úloze se rychlost světla pokusíme změřit pomocí metody rotujícího zrcadla, před jejím vynalezením však bylo více jiných metod, které se vědci snažili uplatnit. Pro historický kontext zde zmíníme dvě z nich.

1.1 Historické metody měření rychlosti světla

1.1.1 Roemerova metoda

Roemerova metoda byla použita roku 1675 dánským astronomem O. Roemerem [1]. Její princip spočíval v pozorování zatmění Jupiteru ve dvou případech: v případě, že se od něj Země vzdaluje, a v případě, že se k němu přibližuje. Posun v čase, kdy zatmění nastávalo, je způsoben rozdílem drah, které světlo musí urazit od Jupiteru k Zemi. Roemer takto odhadl hodnotu rychlosti světla na $c = 225\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [1].

1.1.2 Fizeauova metoda

Fizeauova metoda byla použita roku 1849 francouzským fyzikem H. Fizeauem [1]. Fizeau použil zdroj světla, před který umístil rotující ozubené kolo. Toto kolo svým otáčením střídavě blokovalo a pouštělo světlo v závislosti na frekvenci jeho otáčení, nalezneme-li frekvenci, při které dojde k prvnímu zatmění, můžeme pak spočítat rychlost světla [2]. Výsledkem Fizeauova měření byla hodnota rychlosti světla $c = 313\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [1].

1.2 Metoda rotujícího zrcadla

Rok po Fizeauovovi použil tzv. *metodu rotujících zrcadla* Jean Bernard Léon Foucault [1]. Její základní experimentální uspořádání vidíme na Obrázku 1. Laserový paprsek je namířen na zrcátko Z1, kterým je možné rychle rotovat. Od něj se paprsek odráží na přesně nastavené nehybné zrcátko Z2, které je orientováno tak, aby se paprsek vracel po stejné trajektorii zpět na rotující zrcátko. Pokud je zrovna „rotující“ zrcátko v klidu a dochází k těmto odrazům, vrací se světlo po stejné dráze až do laseru. S použitím děliče svazku před laserem můžeme paprsek odklonit a zaznamenávat jeho pozici (standardně se provádí mikroskopem, milimetrovým papírem, ...).

Pokud ovšem necháme příslušné zrcátko rotovat podstatnou rychlostí, dochází v důsledku konečné rychlosti světla při překonání dráhy $2D$ k malé časové prodlevě $t = \frac{2D}{c}$ mezi prvním a druhým (zpětným) odrazem světla, ve které se zrcátko pootočí. Světlo se pak odráží pod úhlem odchýleným od původního o $\phi = 4\pi ft$, kde f je frekvence rotace zrcátka [2]. S uvažováním vzdálenosti A mezi rotujícím zrcátkem a místem odečtení pak dostáváme dráhové vychýlení paprsku $b = A\phi$ (oproti původní stacionární poloze). Celkový vztah pro rychlost světla pak má podobu (1) [2].

V našem experimentálním uspořádání přidáváme do trajektorie D spojnou čočku s ohniskem na Z1. Toto uspořádání se označuje jako Michelsonova modifikace Foucaultovy metody. Ve své podstatě jen omezuje rozbíhání svazku a dovoluje měřit s delším ramenem D s menší ztrátou intenzity.

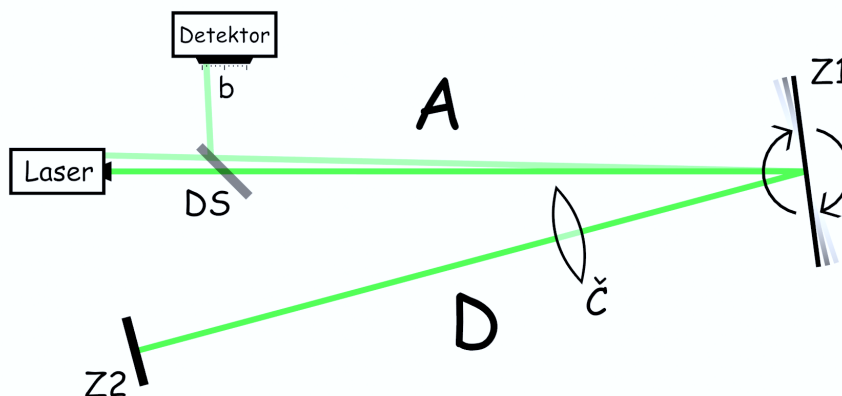
$$c = \frac{8\pi f D A}{b}. \quad (1)$$

2 Výsledky a zpracování měření

2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PIII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota $t = 24,6(4)^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $\Phi = 28(3)\%$, tlak $p = 980(2) \text{ hPa}$.

¹My budeme měřit rychlost světla ve vzduchu, byť onou základní konstantou je samozřejmě rychlost světla ve vakuu.



Obrázek 1: Schématické uspořádání Foucaultovy metody. Autor: Nikita Ustinov

2.2 Aparatura

Nejdříve bylo nutné správně sestavit aparaturu a proměřit diskutované vzdálenosti a parametry. K proměření vzdáleností jsme měli k dispozici pravítka, metry, a laserový dálkoměr. Ačkoliv chyby dané výrobcí u těchto přístrojů jsou v řádu mm, vzhledem k otřesům, nestabilitám a neschopnosti určit parametry jako tloušťka zrcátka atp., které ovlivňují měření, jsme neurčitosti náležitě navýšili. Dostáváme vzdálenosti

$$A = 12,20(5) \text{ m} \quad (2)$$

$$D = 12,15(5) \text{ m} \quad (3)$$

Frekvence otáčení byla měřena digitálním čítačem, jehož senzor byl nastavený v rovině rotujícího paprsku. Používané zrcátko bylo oboustranné, což znamenalo, že měřená frekvence byla dvojnásobná, vůči „skutečné“ frekvenci plných rotací, se kterou počítáme ve vztahu (1). Odečítané hodnoty jsme tedy rovnou půlili.

Klíčové bylo zvolit efektivní způsob zaznamenání dráhové výchylky světla. Měřili jsme sice na vzdálenostech desítek metrů, ovšem při námi dosažitelných rychlostech rotace zrcadla v řádu stovek Hz jsou odchylky stále velice malé. Při prvních testech experimentální soustavy s milimetrovým papírem byla celková amplituda posunu pouze několik milimetrů. Vzhledem k tomu, že má laserový svazek hladký, přibližně gaussovský, profil, je okem takřka nemožné odečíst jeho pozici. Zvolili jsme proto použití digitálního profilometru BC106 od ThorLabs. To nám umožňovalo relativně přesně sledovat pozici svazku, viz 5.

2.3 Naměřené hodnoty

Poté co jsme proměřili a nastavili všechny prvky aparatury, jsme mohli přistoupit k samotnému měření rychlosti světla. Podle vztahu (1) ke změření rychlosti potřebujeme vždy dvojici hodnot: frekvenci f a výchylku dráhy b . Měření tedy probíhalo tak, že jeden z experimentátorů stál u rotujícího zrcadla a na zdroji měnil přivedené napětí, pomocí kterého efektivně reguloval frekvenci otáčení f . Druhý experimentátor pak stál u laboratorního profilometru, který byl připojen k počítači se softwarem od ThorLabs.

Jako nejistoty jsme v této úloze vzali oscilace, které jsme pozorovali na měřicích přístrojích, tedy $\sigma_f = 5 \text{ Hz}$, $\sigma_b = 0,03 \text{ mm}$. Takto naměřená data i s nejistotami jsou uvedena v tabulce 1.

Data z tabulky jsme dále graficky zpracovali a nafitovali lineární funkci v programu Origin, konkrétně s nastavením `Fit linear with X error`, které při výpočtu parametrů zohledňuje nejistotu v naměřených datech. Grafické výsledky fitu jsou k vidění na obr. 2 a hodnota nafitované směrnice μ je

$$\mu = 83(1) \text{ Hz} \cdot \text{mm}^{-1}. \quad (4)$$

Ze směrnice μ a výše uvedených vzdáleností v měřicím uspořádání nakonec můžeme vypočítat hodnotu rychlosti světla:

$$c = 3,09(4) \times 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (5)$$

kde jsme její nejistotu spočetli pomocí metody přenosu chyb [3] vzorcem

$$\sigma_c = c \sqrt{\left(\frac{\sigma_\mu}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2}. \quad (6)$$

Tabulka 1: Naměřené hodnoty frekvence f a dráhové výchylky b .

b / mm	f / Hz	σ_b / mm	σ_f / Hz
-1,95	202	0,03	5
-1,79	222	0,03	5
-1,58	237	0,03	5
-1,42	252	0,03	5
-1,24	266	0,03	5
-1,13	283	0,03	5
-0,90	300	0,03	5
-0,72	315	0,03	5
-0,53	329	0,03	5
-0,42	335	0,03	5
-0,29	351	0,03	5
-0,03	368	0,03	5
0,19	385	0,03	5
0,34	403	0,03	5
0,57	415	0,03	5
0,77	437	0,03	5
1,05	449	0,03	5

3 Diskuse výsledků

Pro porovnání námi získané rychlosti světla s referenční hodnotou přebíráme rychlost světla ve vakuu jako $299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ a index lomu vzduchu o pokojové teplotě jako $n = 1,000$ [4]. Z definice indexu lomu pak plyne, že rychlost světla ve vzduchu bude přibližně $2,998 \times 10^5\,\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak vidíme naše hodnota se s touto neshoduje v rámci nejistoty, ale shoduje se nám alespoň v rámci 3σ chybového intervalu.

Neshoda je nejspíš způsobena nezapočítanou systematickou chybou v postupu. Jedním z možných míst je nesprávné odečtení posunů z profilometru. Senzor jsme měli nastavený ve směru posunu paprsku a zaznamenávali jsme proto jenom posun v jedné souřadnici. Mohlo však nastat k mírné odchylce v druhém směru vlivem pootočení děliče svazku nebo senzoru a naše hodnoty výchylek jsou pak mírně podhodnocené a výsledná rychlost světla by měla vycházet menší, což se shoduje s reálnou hodnotou c .

Vidíme, že do započítané chyby přispívá nejvíce samotná nejistota z lineární regrese. Jak vidíme na Obrázku 2, závislost je zřejmě lineární, ale v datech je poměrně velký šum. To je částečně způsobeno nestabilitou experimentálního zařízení. Sledujeme-li posuny v řádu milimetrů, jsou výsledky ovlivněny sebemenším otřesem, které byly v patře v praxi časté. Pro zmenšení chyby by bylo dobré lépe zafixovat aparaturu nebo středovat měření na každé frekvenci přes delší dobu.

Další zdroje chyb jsou určení vzdáleností a frekvencí. Nejistota vzdáleností by se jistě dala snížit pečlivějším proměřením. Nejistota frekvencí je zde dána převážně oscilacemi, což je ovšem nejspíše vlastností samotného rotátoru zrcadla.

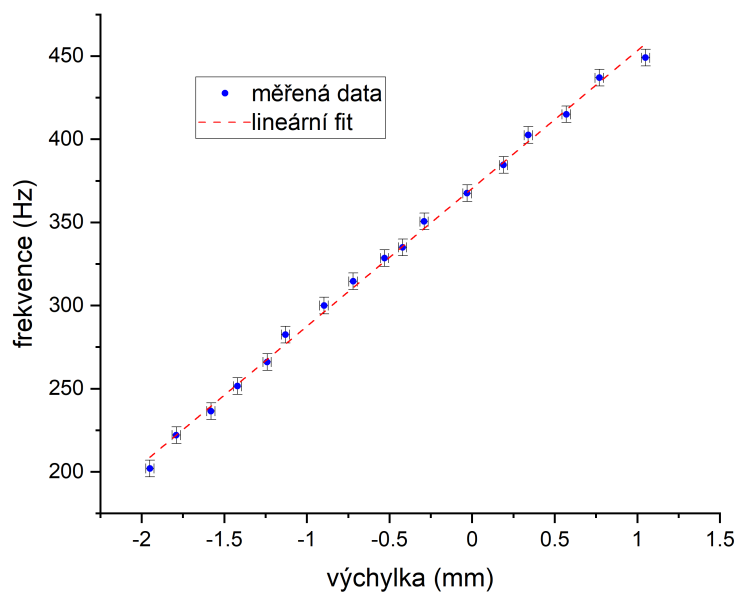
4 Závěr

Pomocí metody rotujícího zrcadla se nám podařilo naměřit rychlost světla c a stanovit ji na hodnotu

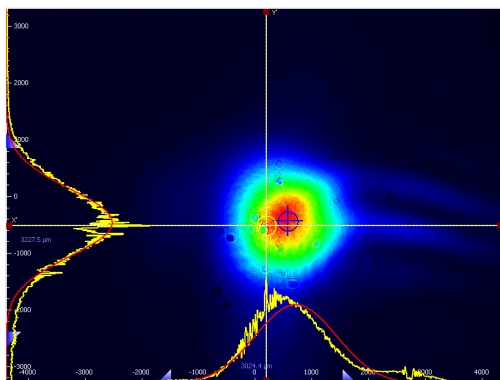
$$c = 3,09(4) \times 10^5\,\text{km} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (7)$$

Reference

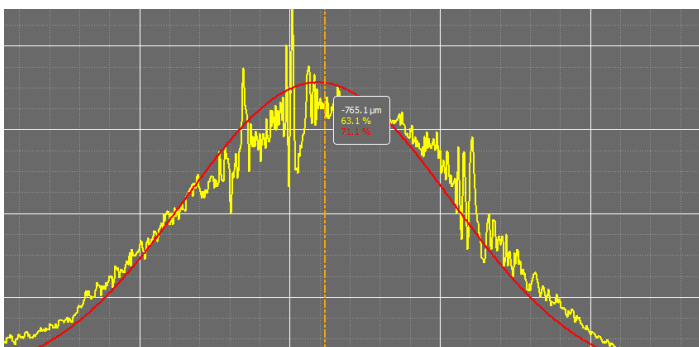
- [1] KAIZR, V. *Měření rychlosti světla*. Aldebaran bulletin. 2004-. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2003-. ISSN 1214-1674.
- [2] Fyz. ústav UK, Učební text k přednášce UFY102: *Metody měření rychlosti světla* [online]. [cit. 2024-04-30]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Metody_mereni_rychlosti_svetla.pdf
- [3] ENGLISH, Jiří. *Úvod do praktické fyziky*. Praha: Matfyzpress, 2006. ISBN 80-86732-93-2.



Obrázek 2: Nafitovaná závislost frekvence na dráhové výchylce



Obrázek 3: Profil laserového svazku



Obrázek 4: Řez profilem použitý k určování polohy peaku

Obrázek 5: Ilustrativní snímky z programu od ThorLabs

- [4] MIKULČÁK, Jiří; KLIMEŠ, Bohdan; ŠIROKÝ, Jaromír; ŠŮLA, Václav a ZEMÁNEK, František. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1987.