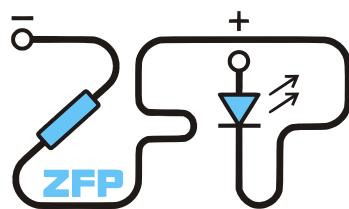


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum III



Úloha č. 20

Název úlohy: Stavba Michelsonova interferometru a ověření jeho funkce

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2024-03-20

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	
<b>Celkem</b>	max. 17	

Posuzoval:

dne:

# Pracovní úkoly

1. Změřte divergenci laserového svazku. Průměry svazku změřte na milimetrovém papíru i měřičem profilu svazků a obě metody porovnejte.
2. Sestavte Galileův teleskop. Změřte, kolikrát rozšiřuje průměr svazku, a výsledek porovnejte s výpočtem rozšíření ze známých ohniskových délek čoček.
3. Sestavte Michelsonův interferometr. Vysvětlete princip vzniku interferenčních proužků.
4. Pozorujte, popište a vysvětlete změny v interferenčním obrazci při:
  - (a) naklánění zrcadla Z4,
  - (b) posunu zrcadla Z3 mikrometrickým šroubem,
  - (c) vkládání skla do svazku ve čtyřech polohách kolem děliče svazku a
  - (d) ohřátí vzduchu v různých místech průchodu svazku.

## 1 Teoretická část

V celém měření budeme používat aparaturu, jež je k vidění na obr. 1, budeme ji sestavovat postupně v pořadí, v jakém budeme plnit jednotlivé pracovní úkoly.

### 1.1 Divergence laseru

V úloze budeme jako zdroj světla používat laboratorní helium-neonový laser. Lasery obecně mají při svícení jistou rozpínavost, resp. divergenci  $d$ , kterou definujeme jako

$$d = \frac{D_2 - D_1}{s}, \quad (1)$$

kde  $D_2$  je průměr svazku naměřený ve vzdálenosti  $s$  od bodu, kde má svazek průměr  $D_1$  [1]. Teoretickou hodnotu divergence nám udává převzatý vzorec

$$d = \frac{2\lambda}{D_0}, \quad (2)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka použitého světla a  $D_0$  průměr otvoru, ze kterého laser vychází. V našem případě pro laser, se kterým budeme pracovat  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  [1].

### 1.2 Galileův dalekohled

Galileův dalekohled je zařízení pro zvětšení obrazu sestávající se ze dvou čoček. Jedna z těchto čoček je rozptylka a druhá z těchto čoček je spojka. Čočky jsou položeny tak, aby měly společné ohnisko.

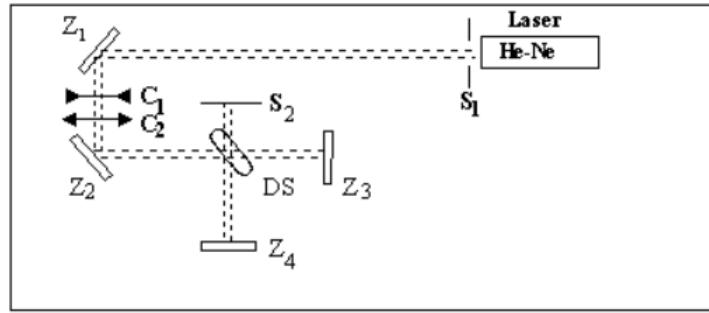
Je-li ohnisková vzdálenost spojky rovna  $f_1$  a ohnisková vzdálenost rozptylky rovna  $f_2$ , bude zvětšení Galileův dalekohledu rovno  $Z = -\frac{f_2}{f_1}$  [1]. Umístění dalekohledu mezi zrcadly Z1 a Z2 je k vidění na obr. 1.

### 1.3 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je jedním z nejznámějších druhů interferometrů a jeho základní uspořádání je složeno jen z několika základních součástek: zrcadla, dělič svazku, zdroj, stínítko/detektor. Jak jsou tyto součástky uspořádány je k vidění v poslední části na obr. 1.

Z teorie elmag. záření nám vyplývá, že jakmile se dva svazky dopadající z obou ramen interferometru na stínítku potkají, pozorujeme na něm interferenční jevy [1]. Při interferenci vždy záleží na fázovém rozdílu dvou dopadajících paprsků a ten mohou nabrat z rozdílu geometrických drah (například při změně naklonění zrcadla nebo při jejich vzájemném posunutí) nebo z rozdílné rychlosti v obou ramenech způsobené odlišnou hodnotou indexu lomu [1].

Interference na stínítku se pak konkrétně projevuje vznikem interferenčních proužků. Tmavý proužek odpovídá minimu intenzity, zatímco světlý proužek odpovídá maximu intenzity. V případě, že by zrcadla byla nastavena perfektně shodně, pozorovali bychom čistý obrazec bez proužků.



Obrázek 1: Schéma měřicí aparatury s laserem, Galileův dalekohledem a Michelsonovým interferometrem [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-hydro-barometrem při pokusu byly následující: Teplota  $t = 23,2(4)^\circ\text{C}$ , relativní vlhkost  $\Phi = 25(3)\%$ , tlak  $p = 993(2)$  hPa.

### 2.2 Divergence laseru

**Metoda:** Naším prvním úkolem bylo proměřit divergenci použitého laserového svazku, k tomu jsme použili dvě metody. První využívala milimetrového papíru a lidského oka k odečtu průměru dopadnutého svazku, zatímco druhá byla založena na profilometrii, kdy jsme proměřili energetický profil laseru pomocí digitálního CCD detektoru. Tento detektor byl spojen s počítačem s příslušným softwarem ThorLabs Beam, který nafitoval profil dopadající intenzity gaussovskou křivkou. Parametr, který jsme zvolili pro studium divergence svazku, nám byl doporučen cvičícím v praktiku a konkrétně šlo o gaussovský průměr ve směru osy  $x$ . Pomocí téhoto technik jsme mohli naměřit průměry  $D$ , vzdálenost  $s$  pak byla zmařena jednoduchým pásmovým měřidlem.

**Nejistoty:** Nejistoty jsme v této úloze odhadli pomocí chyb měřicích přístrojů/nástrojů. Pro milimetrový papír odhadujeme  $\sigma_D = 0,5$  mm, což je polovina velikosti nejmenšího délku. Pro pásmové měřidlo dále odhadujeme  $\sigma_s = 2$  mm, což je dvojnásobek nejmenšího délku, dvojnásobek bereme proto, že při měření na delší vzdálenost se metr různě prohýbal, což mohlo způsobit větší chybu. Nakonec chyba profilometru, tu odhadneme z pozorovaných oscilací, které jsme sledovali v gaussovském průměru, když celá aparatura byla v klidu, tedy  $\sigma_D = 5$   $\mu\text{m}$ .

Pro každou metodu bylo naměřeno 5 hodnot a ty jsou k vidění v tabulkách 1 a 2. Hodnoty z tabulek byly

Tabulka 1: Naměřené hodnoty průměru  $D_2$  ve vzdálenosti  $s$  milimetrovým papírem

$s / \text{cm}$	$D_2 / \text{mm}$
28,6(2)	1,4(5)
63,9(2)	2,0(5)
127,1(2)	3,5(5)
197,9(2)	5,0(5)
259,4(2)	5,9(5)

Tabulka 2: Naměřené hodnoty průměru  $D_2$  ve vzdálenosti  $s$  profilometricky

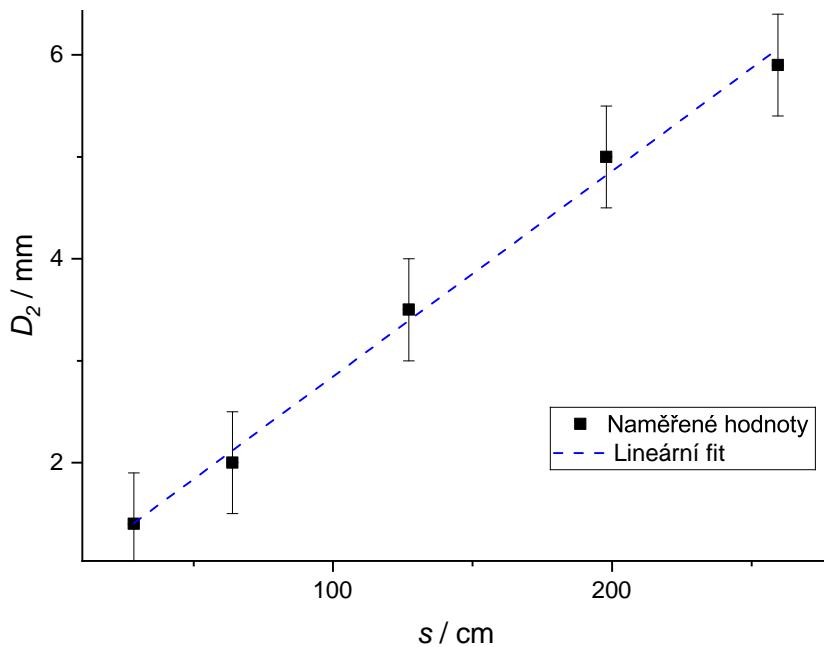
$s / \text{cm}$	$D_2 / \mu\text{m}$
26,9(2)	656(5)
69,1(2)	918(5)
127,9(2)	1580(5)
169,0(2)	1910(5)
223,7(2)	2552(5)

následně naftován programem Origin, konkrétně funkcí Fit linear with X error zohledňující nejistoty v naměřených datech. Grafické výsledky fitování jsou k vidění na obr. 2 a 3. Naftovaná směrnice nám podle vztahu (1) bude odpovídat právě hledané divergenci  $d$  i s nejistotou. Pro metodu s milimetrovým papírem tak máme

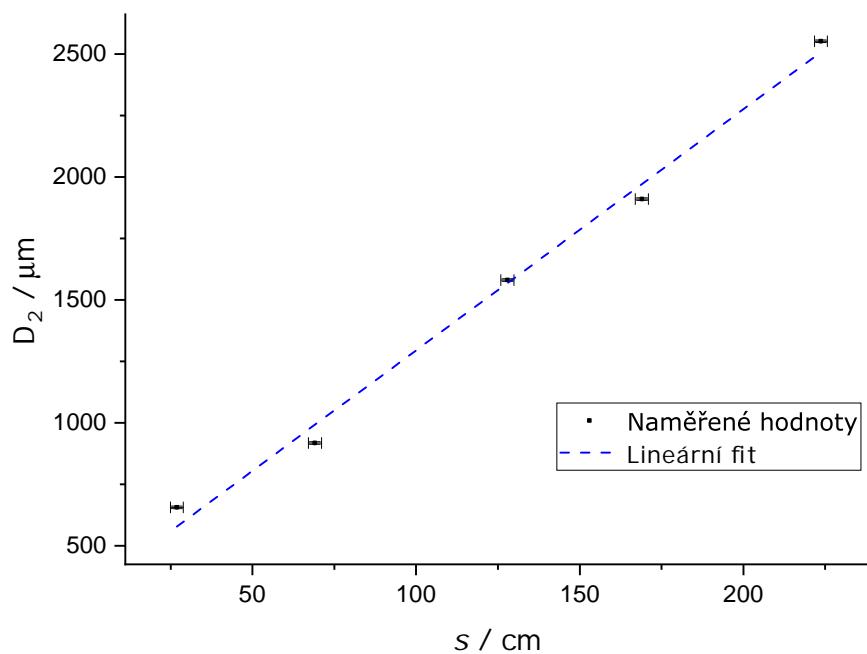
$$d = 2,0(3) \times 10^{-3}, \quad (3)$$

zatímco pro profilometrické měření

$$d = 0,98(5) \times 10^{-3}. \quad (4)$$



Obrázek 2: Závislost průměru svazku  $D_2$  na vzdálenosti od otvoru  $s$  pro měření milimetrovým papírem



Obrázek 3: Závislost průměru svazku  $D_2$  na vzdálenosti od otvoru  $s$  pro profilometrickou metody

## 2.3 Galileův dalekohled

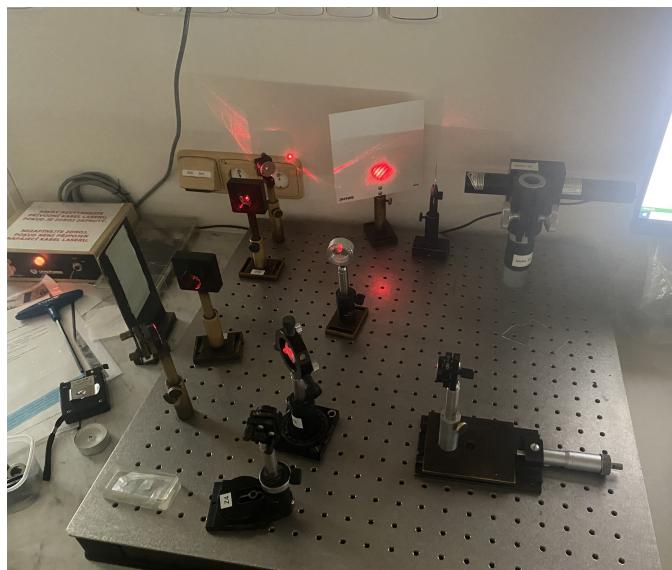
Jakmile jsme doměřili divergenci laserového svazku, bylo potřeba sestavit Galileův dalekohled a ověřit jeho funkčnost. Provedli jsme tak podle schématu na obr. 1. Vždy, když jsme přidali do aparatury nějaké zrcadlo, naaretovali jsme ho tak, aby při zpětném odrazu laser stále ležel ve vstupním otvoru.

Při instalaci obou čoček pak bylo důležité, aby jejich vzájemná vzdálenost byla rozdílem absolutních hodnot jejich ohniskových vzdáleností, které byly uvedeny ve studijním textu jako  $f_1 = -25 \text{ mm}$ ,  $f_2 = 200 \text{ mm}$  [1], tuto vzdálenost jsme měřili běžným pravítkem. Pro ověření funkčnosti našeho dalekohledu jsme nakonec umístili milimetrový papír přímo za něj a před něj a odečetli průměr laserového svazku. Získali jsme tak průměry  $D_{\text{pred}} = 1,8(5) \text{ mm}$  a  $D_{za} = 13,1(5) \text{ mm}$ , podíl těchto průměrů bude roven celkovém zvětšení dalekohledu.

Dostáváme tak  $Z = 7(2)$ , kde jsme nejistotu určili metodou přenosu chyb  $\sigma_Z = Z \sqrt{\left(\frac{\sigma_{D_{\text{pred}}}}{D_{\text{pred}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{D_{za}}}{D_{za}}\right)^2}$ .

## 2.4 Michelsonův interferometr

Poslední část měření týkající se Michelsonova interferometru byla spíše kvalitativní než kvantitativní. Na začátku bylo potřeba sestavit interferometr podle obr. 1. Znovu jsme, podobně jako v předchozích částech, museli dát pozor na to, aby zrcadla byla správně natočená atp. Sestavený interferometr je k vidění na obr. 4



Obrázek 4: Fotografie sestaveného Michelsonova interferometru

Potom, co jsme interferometr sestavili, mohli jsme splnit poslední pracovní úkol. Změny v interferenčním obrazci jsme zaznamenali vyfocením a budeme je dál komentovat.

### 2.4.1 Naklánění zrcadla Z4 (viz obrázky 5 a 6.)

Naklánění zrcadla jsme realizovali pomocí otáčení příslušných šroubků. Když jsme zrcadlo naklonili, pozorovali jsme změnu v hrubosti i ve směru interferenčních proužků. Stojí za povšimnutí, že i po naklonění zůstává stále stejná vzdálenost mezi proužky a všechny jsou orientovány rovnoběžně.

Toto chování interferenčního obrazce se dá očekávat, neboť ačkoliv se celkový dráhový rozdíl změní, podmínky pro každý jeden odražený paprsek zůstávají stejné.

### 2.4.2 Posun zrcadla Z3

Posun zrcadla šel fotograficky zachytit jen těžko, proto se ho pokusíme popsat pouze slovně. Pozorovali jsme to, že i při nepatrnném posunu mikrometrickým šroubem docházelo k rychlému posunu proužků na obrazci. To odpovídá posunu řádu interferenčních maxim a minim, za který je zodpovědná změna dráhového rozdílu mezi oběma rameny.

Kdybychom mikrometrickým šroubem posunovali opravdu opatrně, mohli bychom pak teoreticky napočítat počet posunutí a z podmínky maxim dopočítat vlnovou délku našeho laserového svazku. Toto měření je ale prakticky velmi obtížné právě kvůli citlivosti interferometru na jakoukoliv výchylku.



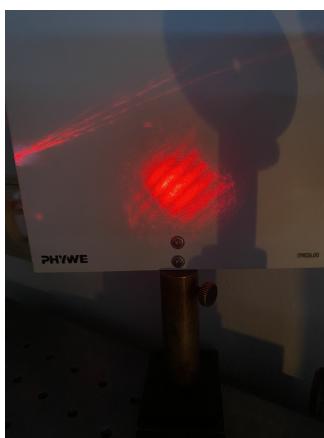
Obrázek 5: Interferenční proužky před nakloněním zrcadla



Obrázek 6: Interferenční proužky po naklonění zrcadla

#### 2.4.3 Vkládání skla (viz obrázky 7 a 8.)

Dále jsme zkoušeli různě do ramen vkládat laboratorní sklíčko. Vložíme-li ho do jednoho z ramen, měl by fyzikální efekt být zpomalení světla v příslušném rameni v důsledku většího indexu lomu. Tato předpověď se nám potvrdila, jak je k vidění na obrázcích níže. Zároveň konstatujeme, že při vložení sklíčka před stínítka se nic



Obrázek 7: Interferenční proužky před vložením skločka



Obrázek 8: Interferenční proužky po vložení skločka

nemění, takto vložené médium totiž nijak neovlivňuje fázový rozdíl mezi dvěma příchozími paprsky. Můžeme si dále povšimnout, že obrazec zůstává stejný v tom, že proužky jsou přibližně pod stejným sklonem a přibližně ve stejných vzdálenostech. To značí, že skločko je opticky poměrně homogenní.

#### 2.4.4 Ohřátí vzduchu (viz obrázky 9 a 10.)

Nakonec jsme vyzkoušeli ještě ohřátí vzduchu v jednom z ramen. To bylo realizováno pomocí zapálené svíčky, kterou jsme k aparatuře vkládali. Ohřátí vzduchu se ukazuje jako značně chaotický proces, který ovlivní nerovnoměrně index lomu. Výsledný interferenční obrazec je pak velmi nepravidelný a zakřivený. Hned po přiložení svíčky jsme také (což není vidět na fotografiích) pozorovali promíchávání vzduchu, které v čase interferenční obrazec chaoticky měnilo.

### 3 Diskuse výsledků

#### 3.1 Měření divergence

Hlavní věc, které bychom si na měření divergence měli povšimnout, je, že se profilometricky změřená hodnota a hodnota naměřená milimetrovým papírem neshodují ani v rámci nejistoty. I přesto však pozorujeme řádovou



Obrázek 9: Interferenční proužky před ohřátím svíčkou



Obrázek 10: Interferenční proužky po ohřátí svíčkou

shodu. Čím to může být způsobeno?

První a nejjednodušší vysvětlení můžeme hledat ve výběru parametru. Je jisté, že oblast tvořená nasítovaným gaussovským průměrem neodpovídá oblasti laseru, pro kterou je lidské oko barevně nasyceno. Může se ale také stát, že nejen, že tato oblast nebude odpovídat, ale že obě oblasti budou mít jinou divergenci.

Dalším vysvětlením je jednoduše podhodnocení chyby ze strany experimentátora, měření milimetrovým papírem bylo nejspíše méně přesné, než je polovina nejmenšího dílku milimetrového papíru, obzvlášť v oblasti těsně před otvorem, z něhož vystupoval laser.

Posledním důvodem, který zde uvádíme, je nedostatek naměřených hodnot. Laboratorní podmínky a pevné upevnění laseru nám bohužel nedovolily proměřit divergenci na větší vzdálenost a museli jsme tak pracovat s relativně malým počtem hodnot pro lineární fit.

Nakonec bychom mohli ještě pro účely diskuse použít vztah (2) a pokusit se nalézt teoretickou hodnotu divergence. Ukazuje se ale, že neznáme přesně průměr laserového otvoru. Odhadneme-li ho na 1 mm, dostáváme přibližnou hodnotu  $d \approx 1,3 \times 10^{-3}$ , která alespoň orientačně odpovídá oběma naměřeným hodnotám.

### 3.2 Galileův dalekohled a Michelsonův interferometr

Oproti předchozí části byly výsledky z této části uspokojivé. Námi změřená hodnota zvětšení Galileova dalekohledu odpovídá v rámci nejistoty předpovídané hodnotě. Tu jsme vypočetli z poskytnutých ohniskových vzdáleností  $Z = -\frac{200}{-25} = 8$ . Dále se už můžeme zaměřit pouze na kvalitativní rozbor. Pozorovali jsme dobrý zpětný odraz laseru a aparatura se zdá fungovat tak, jak by měla.

Při pozorování interferenčních obrazců se jejich chování shoduje s fyzikálním vysvětlením, velmi dobře se například potvrdilo vkládání sklíčka do jednoho z ramen, kdy se interferenční obrazec sice změnil, ale zůstal relativně rovnoměrný.

## 4 Závěr

V rámci měření jsme stanovili divergenci  $d$  laserového svazku milimetrovým papírem a profilometricky na hodnoty

$$d_{mil} = 2,0(3) \times 10^{-3}, \quad d_{profil} = 0,98(5) \times 10^{-3}. \quad (5)$$

Dále jsme sestavili Galileův dalekohled, u kterého jsme přibližně stanovili jeho zvětšení na

$$Z = 7(2), \quad (6)$$

což je hodnota shodující se s očekávanou. V poslední části měření jsme sestavili samotný Michelsonův interferometr a provedli jsme kvalitativní rozbor různých změn interferenčních obrazců.

## Reference

- [1] *Stavba Michelsonova interferometru a ověření jeho funkce* [online]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/320>