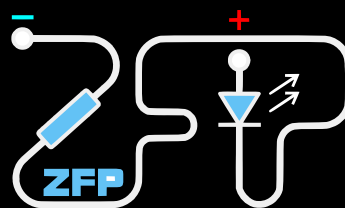


Krabinet  výuky obecné fyziky,  
UK MFF

## Physicální practicum III



### Optica



#### Úloha č. 14

**Název experimentu:** Stavba Michelsonova interferometru  
a ověření jeho funkce

**Jméno studenta:** Josef Iosephus Kučera

**Datum incidentu:** 05. 04. 2022



#### Připomínky opravujícího:



V první řadě - formát Vašeho protokolu je zcela nevyhovující. I když je prozaická podoba místy možná i zábavná a dobře míněná, tak neodpovídá regulárnímu výstupu z fyzikálního měření, kterým má protokol z fyzikálního praktika skutečně být - je to příprava na tvorbu mj. i vědeckých článků, které tímto způsobem psát vážně nejde. -2b.

Délka protokolu má být do 10 stran

..  
Jinak je Vaše zpracování vcelku zdařilé, pro lepší práce mám razítko, "Great work", které vzhledem k inverznímu podkladu není možné použít... :)

..  
Další připomínky - viz text

	Možný počet bodů▼	Získaný počet bodů▼
Theoretická část	0–2	2
Výsledky <u>měřeníhož</u>	0–9	6
Diskuse	0–4	3
Závěr	0–1	1
Použité <u>knižstvo</u>	0–1	1
<b>Suma <del>sumárum</del></b>	max: 17	13 - 2 (forma) <b>11</b> bodů

Posuzoval: Jiří Prchal

dne: 9.5.2022

---

## Poznámka před čarou

Jelikož na závěr uvádímež pár pěkných temných fotografií, volíme invertované stylisování protokokakolu, abychom byli styloví a mělo to tady tu správnou atmosféru.

---

## Pracovní úkol

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
  - (d) ohřátí vzduchu v různých místech průchodu svazku.

### Základní vztahy a klíčová slova:

*interference dvou svazků, fázový a dráhový rozdíl, koherenční délka, princip Michelsonova interferometru*

---

## Theoretická část

### Interference

Nejprve by se slušelo něco si říci o jevu zvaném interference. Není to žádná černá magie, ačkoliv by se tak mohlo zdáti na základě barevné palety tohoto protokokakolu.

Interference, *inter* (latinsky: *mezi*) a *ferein* (řecky: *nésti*) jest podivnou chimérou 2 slov. V přírodě ji můžeme pozorovat kdykoliv se setkají 2 různé vlny. Nejsme žádná vořezávátka, tak víme, že i světlo jest vlnění (elektromagnetické).

V oblasti, kde se střetne ~~mexická~~ vlna s jinou vlnou dochází k vektorovému sčítání  $E_n(t, r)$  intenzit.

Arci výsledná intenzita elektrického pole  $I$ , nemusí být nutně součtem intenzit  $I_1$  a  $I_2$  jednotlivých vln. V komplexním zápise je intenzita násobek vektoru elektrického pole s jeho komplexně sdruženým bratříčkem. Pro dvě vlny s rovnoběžnými vektory intenzity elektrických polí v jednom čase je výsledná intenzita rovna (ukradeno z [1]):

$$I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + 2\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (1)$$

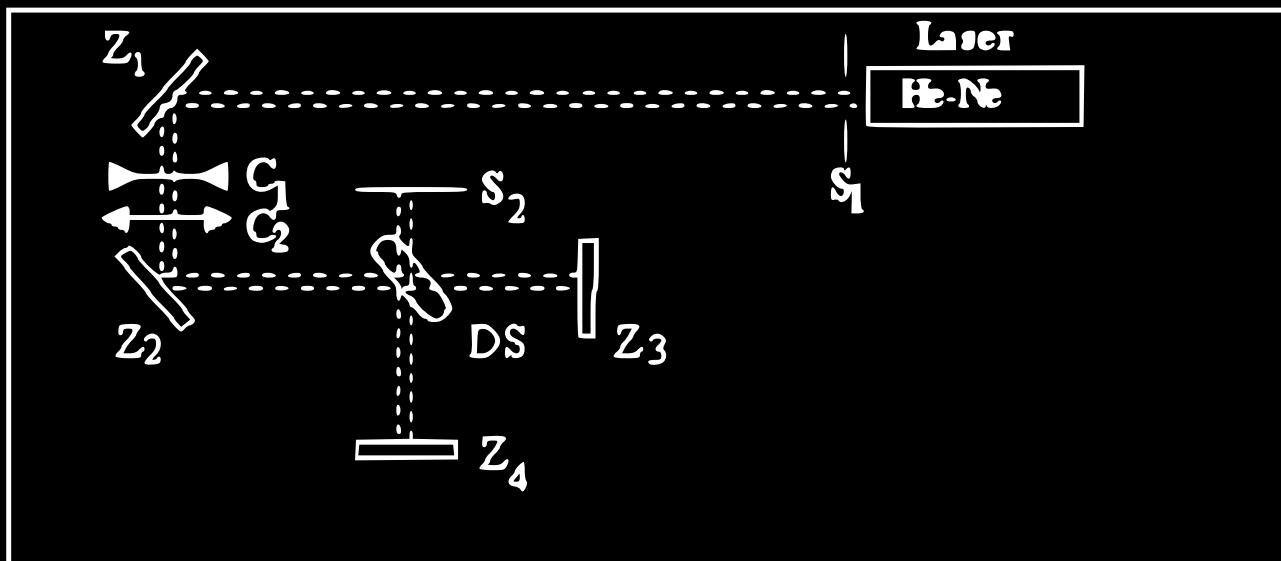
$$I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi_2 - \phi_1 \quad (2)$$

kde ~~ta hnusná věc~~ výraz s odmocninou se nazývá interferenční člen

Můžeme se taky zamyslet (~~spoiler: bolí to!~~), že interferenční člen jest maximální, když jest rozdíl fázových náběhů jednotlivých intenzit elektrického pole roven sudým násobkům  $\pi$  a minimum nastává naopak v případě, když jest rozdíl roven lichým násobkům  $\pi$ .

## Měřicí obvod

Experiment jsme měřili v uspořádání z obrázku 1)



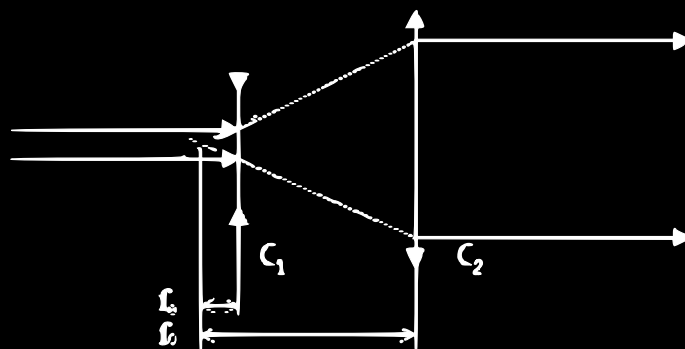
Obrázek 1: Schéma Michelsonova experimentu, ukradeno z [2]

Kde nahoře napravo máme vysokoenergetický He-Ne Laser fokusovaný stínítkem  $S_1$  do kruhové stopy. Dále  $Z_1$ ,  $Z_2$  a  $Z_3$  a  $Z_4$  jsou náklonná zrcátka,  $DS$  ukrývá v sobě zkratku pro dělič svazku, který půlku paprsku propustí skrz do zrcadla  $Z_3$  a druhou půlku odrazí do zrcadla  $Z_4$  a  $S_2$  je pak stínítko na něž dopadá finální obraz.

~~Mo(u)drý čtenář se nyní zajisté ptá: „Nojo voe, ale co to  $C_1$  a  $C_2$ , to je snad buřt?” Nikoliv! Tuto tajnou myška-věc též nyní popíšeme!~~

## Galileiho teleskop

Na obrázku 1) je znázorněna rozptylka  $C_1$  a spojka  $C_2$ , obě dohromady tvoří tzv. Galileiho teleskopek (viz. obr 2).



Obrázek 2: Galeileiho teleskopek, ukradeno z [2]

---

~~Kdybychom byli Karkulkou, zeptali bychom se babičky:~~

~~„Babičko, proč máte v té soustavě Galileův teleskop?“~~

~~A babička by odpověděla:~~

~~„Oči mi už moc neslouží, děvenko, mám ho tam, abych lépe viděla interferenci na zdi. Sama vidíš, že na obrázku 2 se svazek pěkně zvětší, aniž by ztratil svou kolinearitu, dítě.“~~

~~Ale nechme ty 2 ženštiny být, ať si je třeba sežere vlk. My máme důležitější práci, než se prohánět za děvčaty. Chceme napsat protokol alespoň na  $\Sigma - 7$  bodů, aby nám nebyl omlácen o hlavu.~~

### **Rozdíl fázový a rozdíl dráhový**

A proto si ještě řekneme něco o rozdílu fázovém a rozdílu dráhovém. Veličinu  $\phi_n(r)$  nazýváme fází vlny „ $n$ “ (ale mohli bychom ji nazývat třeba *Fidel Castro*, název vlny nehraje žádnou roli, dokud víme, kterou vlnu popisujeme a nemáme v tom bordel). Opět uplatníme naše komplexy a komplexně zapíšeme vektory intenzity [1]:

$$E_n = E_{0n} \exp(i(\omega t - \vec{k}_n \cdot \vec{r})) \quad (3)$$

kde  $\vec{k}$  je vlnový vektor.

Pro vlny se stejnými vlnovými vektory můžeme být líni jak vši a popisovat problém v ose kupříkladu „ $z$ “. V instantním okamžiku jest pak fázový rozdíl darován vztahem  $k_1 z_1 - k_2 z_2 = k \Delta z$ . My však zneužíváme k interferenci 1 rozdělený svazek, počáteční rozdíl fází tedy roven jest  $= 0$ .

---

## ***Divergence paprsku***

V okolu 1 se po nás chce změřiti divergence (alias rozpliznutí) ležrového paprsku, ta se počítá dle následující rovnice [1]:

$$d = \frac{D_2 - D_1}{s} \quad (4)$$

kde  $D_1$  průměr u výstupu paprsku je a  $D_2$  průměr ve vzdálenosti  $s$ .

Tuto divergenci můžeme měřiti buď přímo odečtem z milimetráku nebo přesněji na kompíčku pomocí detektorku, anžto zaznamenává prostorové rozložení energie.

## ***Použité přístroje***

Byl použit

~~Jako zbraň hromadného ničení byl zneužit~~ He-Ne laser s vlnovou délkou  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ .

~~Tedy rudý jako vlajka sovětského svazu, nebo výše zmíněná Kar- kulka.~~

# Výsledky měřeníhož

## Divergence paprsku

Nejprve jali jsme se měřiti rozptyl paprsku napřímo ~~takříkajíc z jedný vody načisto~~. Metrem jsme si změřili vzdálenost od výstupu z laseru. Na milimetrový papír jsme pak začadili flek, jehož průměr jsme pak horko těžko odečítali.

Náš výplod jest toliko v tabulce 1.

Tabulka 1: Přímé měření divergence paprsku

hranaté závorky : [ ]  
mají specifický význam  
Podle ČSN ISO 80000-1  
platí pro označení:  
Q = {Q} [Q]  
Q - příslušná veličina  
{Q} - číselná hodnota Q  
[Q] - jednotka veličiny Q  
tj. uvnitř závorek je VELIČINA,

výsledkem tohoto výrazu je JEDNOTKA

tedy - [l] = m ...jednotkou délky "l" je "metr" (značka "m"), kdežto např. [m] = kg, že? Lépe zapisujte l / m nebo l (m).

(cm)

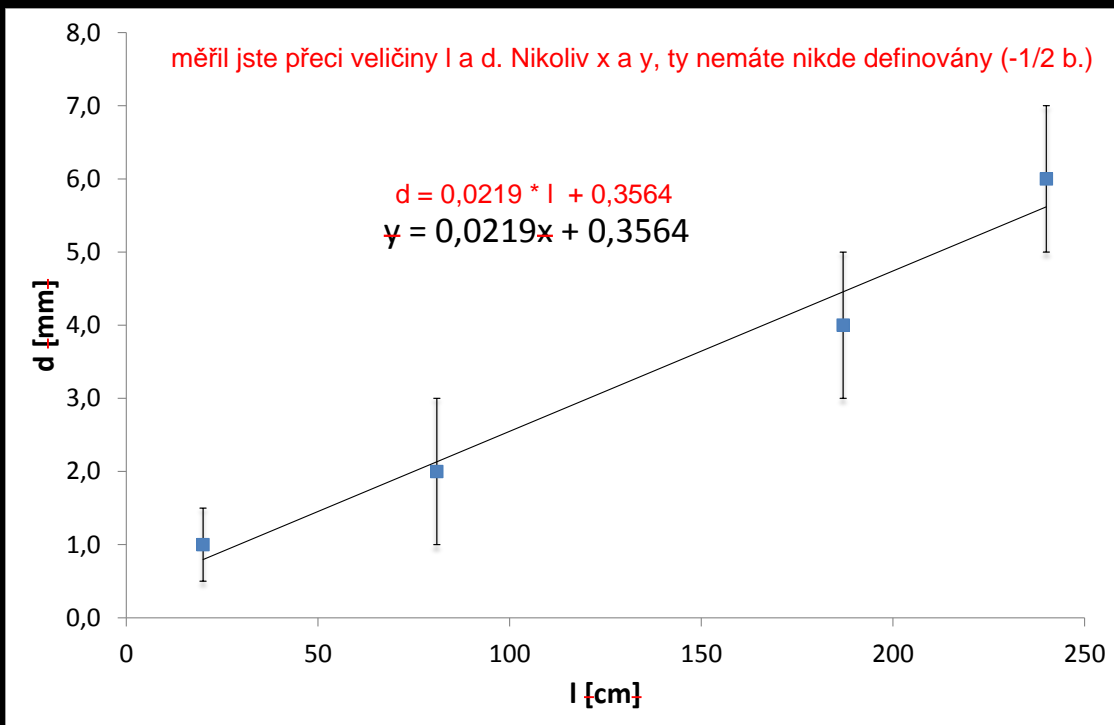
$l$ [cm]	$\epsilon_l$ [cm]	$d$ [mm]	$\epsilon_d$ [mm]
240,0	2,0	6,0	1,0
187,0	2,0	4,0	1,0
81,0	1,0	2,0	1,0
20,0	0,5	1,0	0,5

*Pozn.: Nejsme naivní a tak si hned všimneme, že toto měření jest zatíženo velikou systematickou chybou. Chybu u měření vzdálenosti  $l$  nám pro větší vzdálenosti vytváří například prověšení metru.*

*U odečtu průměru paprsku  $d$  z milimetrového papíru nám zase vrásky na čele tvoří například chybně zakreslený průměr svazku, případně i u nižších hodnot nedostatečná přesnost odečtu z milimetrového papíru, příště by to chtělo měřit s mikrometrovým papírem (ne, že by to nějak pomohlo, ale cítili bychom se alespoň nóbl).*

~~Ale i přes tyto těžkosti pokusíme se o lineární regraci všecek našich 4 bodův.~~

~~Na tuto stránku se to už bohužel nevejde, no smůla, co se na to dá jiného říci...~~



Obrázek 3: Lineární regrese divergence paprsku (přímé měření)

V čase pozdějším divergenci ještě pojali jsme se měřiti přístrojem elektronickým! Výsledky uvádíme toliko v tabulce 2.

Tabulka 2: Elektronické měření divergence paprsku

$l$ [cm]	$\sigma_l$ [cm]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\sigma_d$ [ $\mu\text{m}$ ]
179,0	2,0	2087	100
129,0	2,0	1515	100
62,0	1,0	916	50
26,0	0,5	653	10

$x$  a  $y$  jsou jaké veličiny?  
 Užíváte tyto proměnné jak zde, tak i ve fitech v grafech - Obr.3 a 4. Ale nejsou to známé fyzikální veličiny... !

-1/2 b.

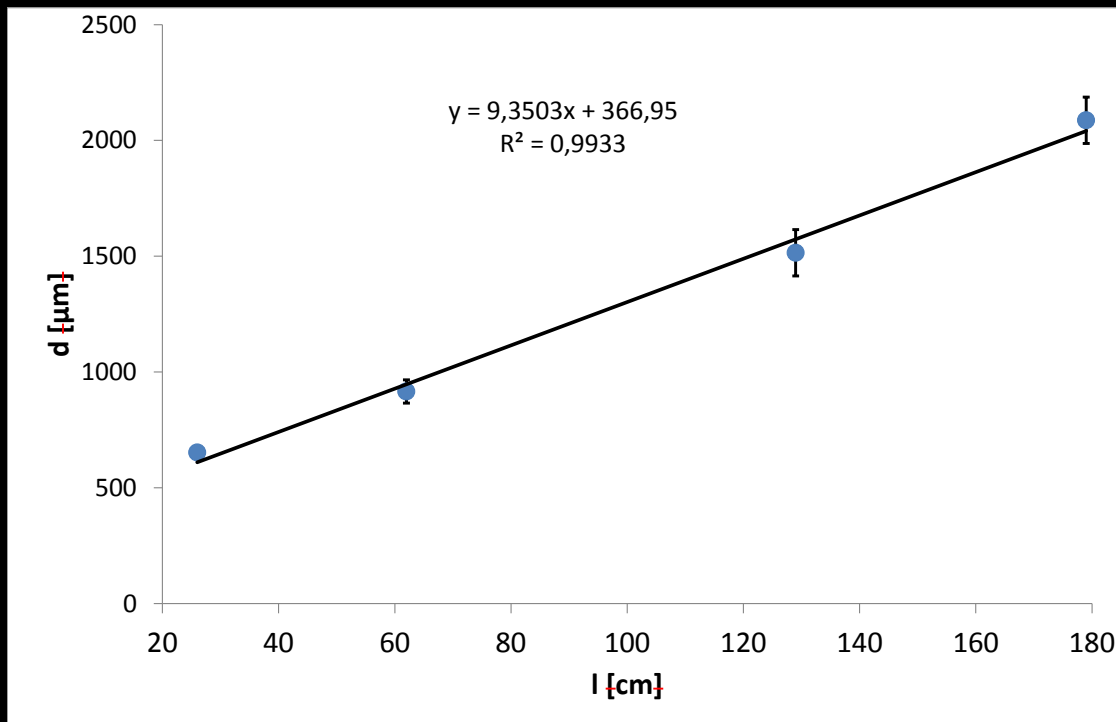
Pozn.1: jako průměr  $d$  jsme brali zprůměrované hodnoty  $x$  a  $y$  gaussovsky prostorově uspořádané energetické intenzity.

Pozn.2: A hned vidíme, že vzdálenost  $l$  měříme opět stejně blbě (rozuměj se stejnou systematickou chybou), protože opět používáme prověřující se metér.



Nicméně toto měření jest přesnější, co do odečtu průměru paprsku  $d$ . Příklad sice ~~frkal~~ cifry přesné na desetiny mikrometru, ale přiznejme si to narovinu, cifry poskakovaly ~~jako koza v petrželi~~. Tedy museli jsme chybu zvýšit, aby pokryla toto „šibáníčko“.

Tedy opět provedeme lineární regraci.



Obrázek 4: Lineární regrace divergence paprsku (PC měření)

A z proložení lineární regrace respektive z její zvýšené hodnoty spolehlivosti  $R^2$  vidíme, že závislost jest lineárnější, což očekáváme z rovnice (4) a tedy i naše měření bylo tentokrát přesnější.

? Jaká je tedy výsledná divergence svazku ?

-1b.

## Galileův teleskop

Pak jsme se zvrhli na měření zvětšení paprsku prošlým Galileovým teleskópkem a dostali jsme ~~po hubě~~ následující čísla:

$$d_1 = 2 \pm 1 \text{ mm}$$

$$d_2 = 11 \pm 1 \text{ mm}$$


kde  $d_1$  jest průměr paprsku zaznamenaný na milimetrový pepér před vstupem do teleskopu a  $d_2$  jest průměr paprsku zaznamenaný na milimetrový papír po výstupu z teleskopu.

Dostáváme tedy zvětšení

$$Z = 5,5 \times \quad \pm ? \text{ Jaká je chyba vašeho zvětšení } Z ? \quad -1b.$$

Teď to porovnáme s tím, co bychom měli dostat v ideálním světě, kde zvětšení  $Z$  počítá se přímo jako poměr ohniskových délek [1].

$$Z = \frac{200 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 8 \times$$

~~Ó kruci, to nám tedy vůbec nevyšlo . Chyba bude nejspíše v chybě měření  $d_1$ . Prostě sorry jako ale 2 mm je na měření na milimetrovém papíru fakt moc hrubé.~~

## Michelsonův interferometr

Podle obrázku 1. jsme zbastlili interferometr a následně vrhali jsme na zeď  $S_2$  interferenční prasátka. Interferenční ~~blázinec~~ vznikne pomocí děliče svazku  $DS$ , který udělá z paprsku schisofrenika, rozdělí jej na 2 malé do školky, kteří mezi sebou interferují na stěně, jelikož geometrické dráhy anóbrž i optické dráhy paprsků ve větvích nejsou si rovny (~~jako lidi ve feudálním systému~~), přicházejí na stínítko s jinou fází.

Pokud klopíme zrcátkem  $Z_4$  nebo  $Z_3$  měníme šířku maxim (resp. minim). Ale nejenom to! My dokonce měníme i sklon interferenčních proužků! Cím je to způsobeno? - viz úkol 4 (a) -1b .

Pokud jmeme se posouvatí pouze zrcadlo  $Z_3$  dodáváme do systému fázovou změnu, takže pouze měníme optickou dráhu paprsku ale neměníme ani šířku ani sklon interferenčních obrazců.

9 K čemu se tento jev využívá? Souvisí to přímo s příčinou stavby interferometru - měření použité vlnové délky. Při posunu zrcadla o známou délku a při spočtení počtu prošlých interferenčních proužků je možno určit vlnovou délku. Jak je v názvu úlohy - "...ověření jeho funkce"

Pokud v jedné větvi vložíme světlu do cesty filtr, dostaneme snížení intensity maxim a zvýšení intensity minim. Celkově se tak sníží rozdíl mezi minimy a maximy. Jest tomu tak protože se sníží intenzita jednoho ramene vlny a destruktivní interference už není tak destruktivní a konstruktivní interference tak konstruktivní.

Pokud ale filtr vložíme před rozdělení svazku, pozorujeme proporcionální snížení intensity, minima zůstanou stále stejně intenzivní, maxima poklesnou.

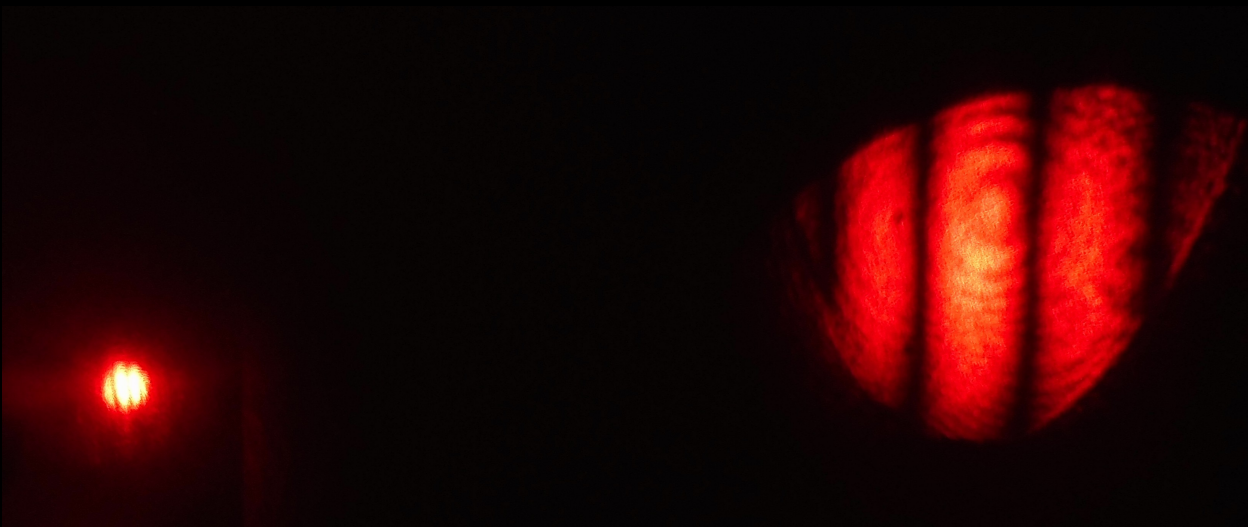
Pokud zapálíme ohníček v jedné části paprsku, dostaneme nelineární prostředí a ~~světe div se! Div se!~~ Dostaneme i vlnité proužky interferenční! ~~No kdo by to čekal? Vy snad ano?~~

A tak tedy vysvětlení? - To byste měl uvést... - viz společné zadání pro všechny úkoly 4 (a)-(d) "...a vysvětlete.."

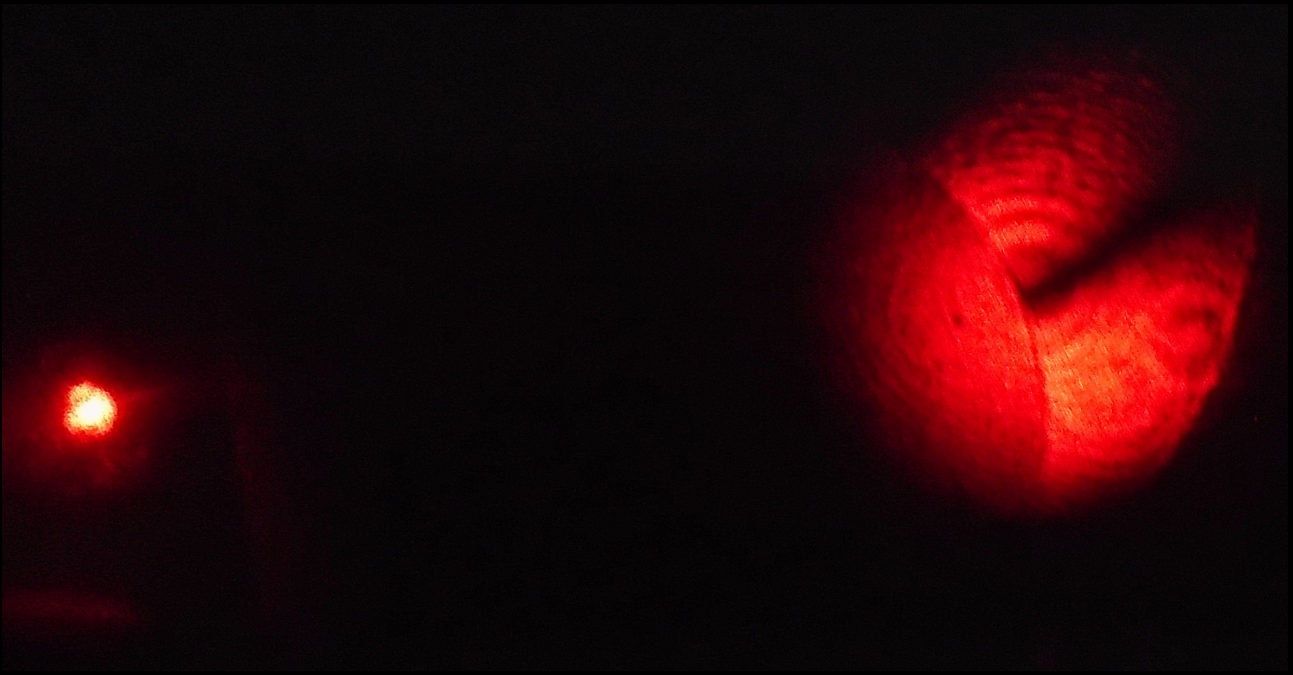
A nyní můžete se pokochati exklusivními fotografiemi! Povedla se nám v měření skvělá věc! Dostali jsme vedle hlavního prošlého světla i jeho komplementární složku odraženou, která též interferovala a pozorovali jsme tak obrácené interferenční proužky!

-1b.

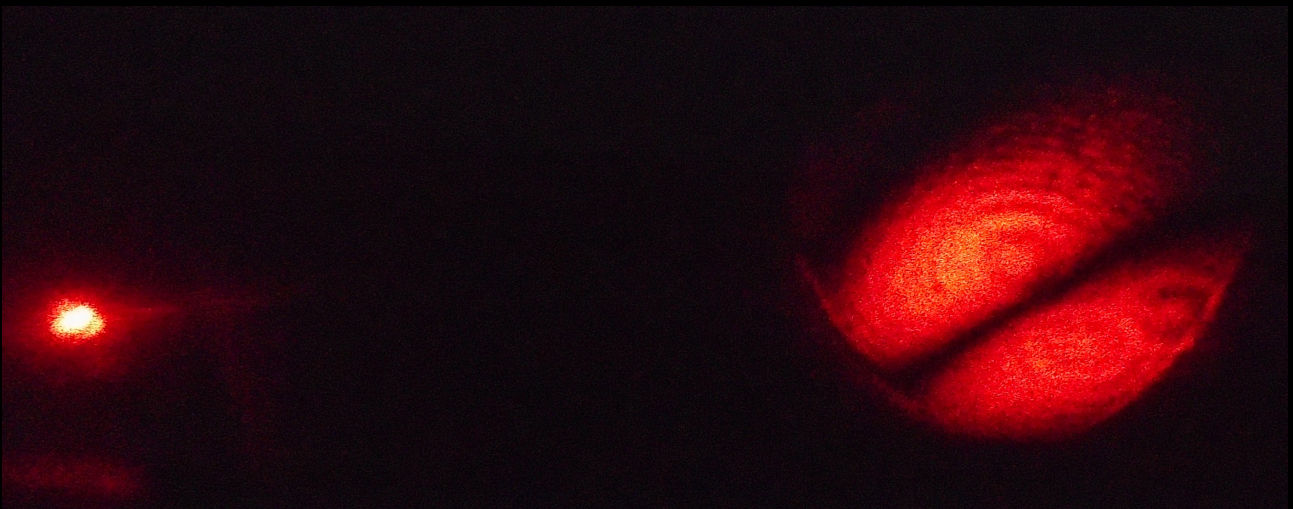
Pěkné :)



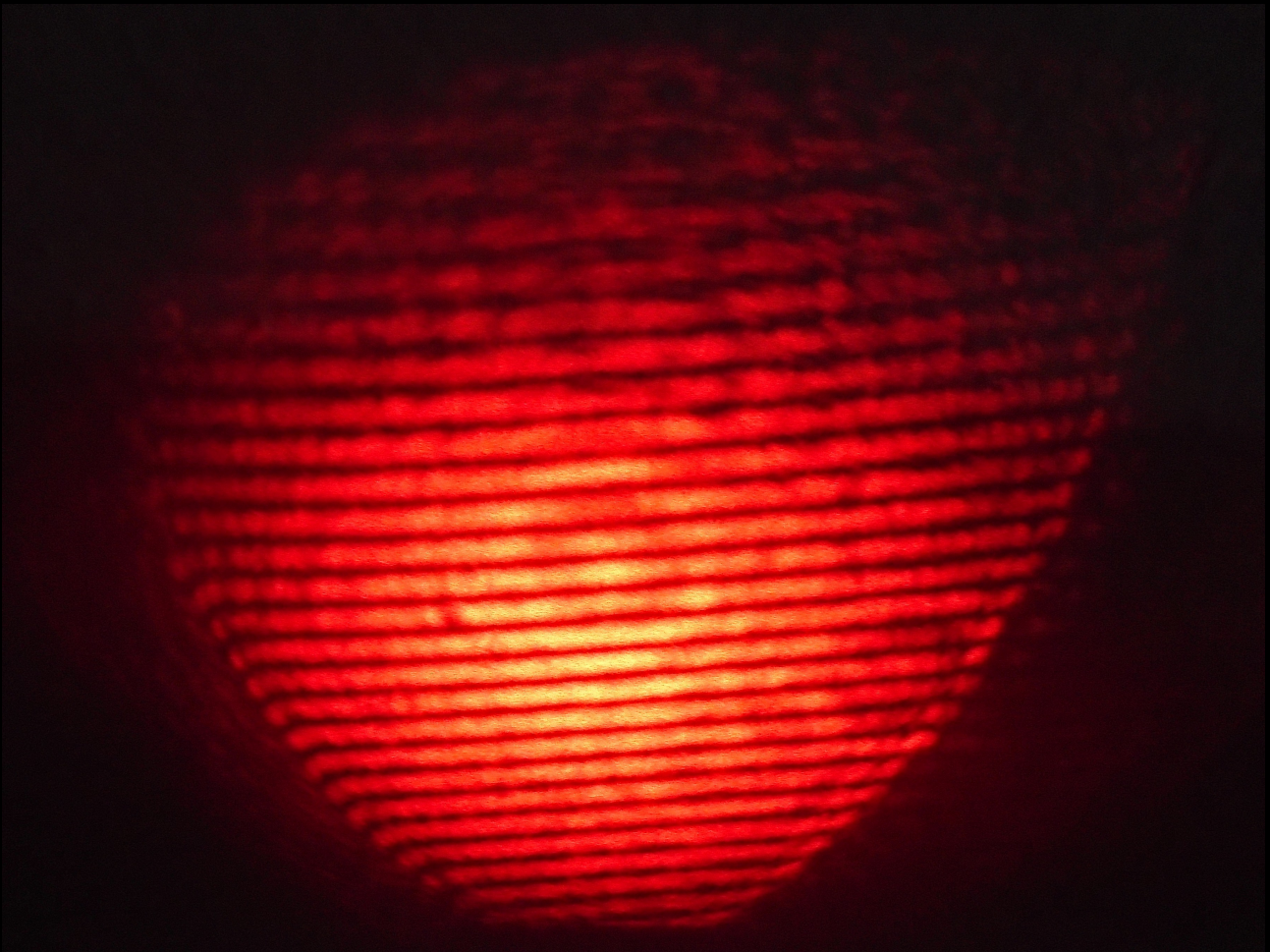
Obrázek 5: Vpravo interferenční proužky prošlého světla, vlevo interferenční proužky odraženého světla



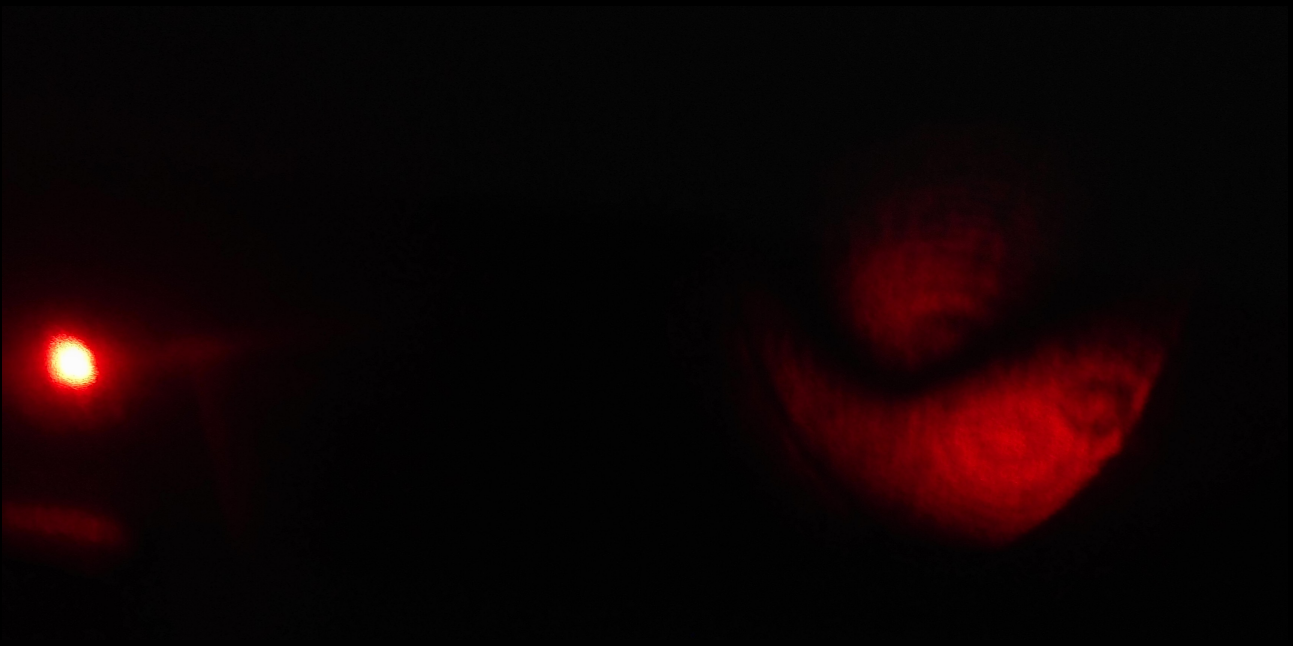
Obrázek 6: Interferenční obrazec po vložení prstu mezi zrcadlo a jeden paprsek



Obrázek 7: Interferenční proužky o jiném náklonu



Obrázek 8: Zhoršená interference vedoucí v jemnější interferenční proužky



Obrázek 9: Nelineární interferenční proužek

## Diskuse

~~Mission Impossible~~. Měření divergence laseru pomocí milimetrového papíru byla nesplnitelná mise hned od začátku! Příliš hrubé měřítko, respektive příliš úzký svazek, poměrně nevýrazná změna, archaické měřicí přístroje. Ach ta enormní chyba! Bolela nás z ní hlava!

Raději byste mohli tuto chybu vyčíslit a posoudit, jak by bylo možné ji zlepšit

AI, umělá inteligence Měření pomocí detektoru už bylo značně lepší, ale ještě přesnější by bylo, kdyby detektor uměl odečítat i vzdálenost a nemuseli bychom tak býti závislí na měření vzdálenosti metrem.

Porovnání výsledků získaných milimetrovým papírem vs. měřičem profilu - toto porovnání je výslovně žádáno v zadání

-1b.

~~Nevidím zlo, neslyším zlo~~ U Galileova teleskopu jsme opět měli problém s odčítáním z milimetrového papíru, což nás stálo nervy i výsledek. Tedy naše naměřená hodnota se neshoduje s tou theoretickou.

~~Star Wars~~ Interferometr se nám nepodařilo ideálně sestavit (jinak by se odražený laserový paprsek vracel všecken zpět do zdroje). Ale jako odškodnění jsme dostali od matky přírody pěknou interferenci a reversní interferenci na stěně vedle sebe.

V Diskusi je třeba nejprve posoudit Vaše výsledky uvedené v předchozí části Výsledky. Ty potom porovnat s předpokladem. Pokud nastala shoda, pak tento fakt konstatovat. Pokud shoda nenastala (v rámci chyby), tak se pokusit najít příčinu, navrhnout zlepšení atp.

## Závěr

V Závěru má zaznít především Váš výsledek měření. Stručně a zřetelně. Bez dalších komentářů - ty mají prostor v Diskusi

Změřili jsme divergenci ležrového paprsku methodou odečtu z milimetrového papíru a methodou odečtu z kompíku.

Na základě lineární regrace jsme porovnali jejich přesnosti.

Toto porovnání a posouzení výsledku patří do Diskuse

Dopočítané zvětšení Galileova teleskopu  $Z = 5,5\times$ , neodpovídá theoretickému zvětření  $Z = 8\times$  (dané z podílu ohniskových vzdáleností čoček).

Může za to chyba. Nikoliv naše, ale chyba měření systematická! Milimetrový papír, spalte ho!

Měření Michelsonovým interferometrem jsme si velice užili a pozorovali jsme úžasné interferenční jevy, které nejenomže odpovídaly našim představám pramenícím z theorie, ale dokázali jsme je i vysvětliti.

Hráli jsme si tak s náklonem interferenčních proužků, intenzitou maxim a minim, jejich linearitou i s jejich četností.

### TÉTO ÚLOZE DÁVÁME 10/10 BODŮ!

Dobrá, těší mě, že Vás tato úloha zaujala.

Je to znát na Vašem projevu.

Pro lepší výstup z Vašich měření trochu upravte svůj styl psaní a sledujte přesnější znění zadání, resp. pracovních úkolů

---

## Použité knižstvo

- [1] Studijní text k Fyzikálnímu Praktiku III. 20. Michelsonův experiment. [online] [cit. 2022-06-04]. Dostupné online z:  
[https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_341.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_341.pdf)
- [2] Pokyny k měření k Fyzikálnímu Praktiku III. 20. Michelsonův experiment. [online] [cit. 2022-06-04]. Dostupné online z:  
[https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/pokyny/mereni\\_320.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_320.pdf)