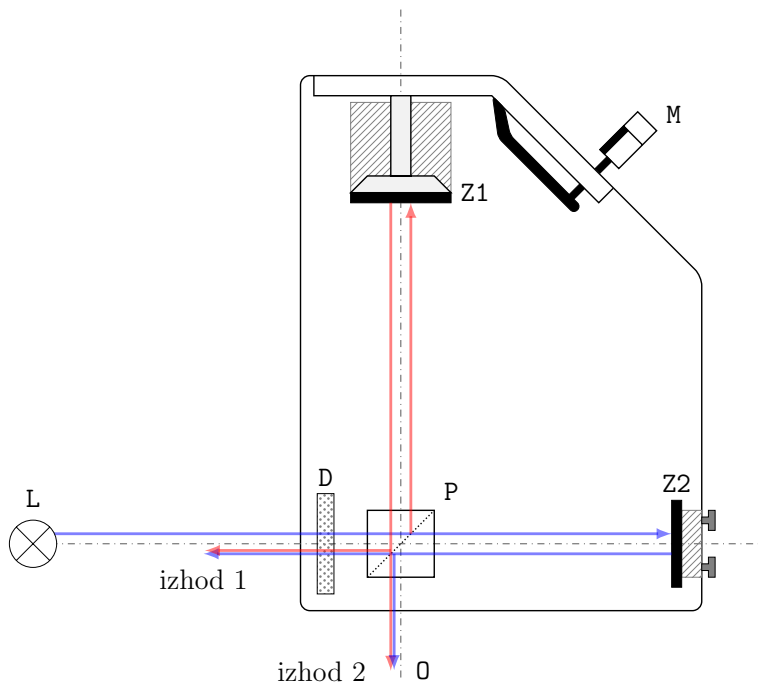


# Michelsonov interferometer

## Uvod

Michelsonov interferometer [1] je sestavljen iz treh osnovnih elementov: dveh ravnih zrcal ter polprepustnega zrcala. Shema interferometra je prikazana na sliki 1. Interferenčno sliko lahko opazujemo na opazovalnem zaslonu, če imamo dovolj svetlobe, pri manjših svetlobnih intenzitetah pa gledamo naravnost v interferometer.



**Slika 1:** Michelsonov interferometer je sestavljen iz polprepustnega zrcala in dveh ravnih ogledal. Vpadni svetlobni snop se na polprepustnem zrcalu P razdeli na dva delna snopa, ki padata pravokotno na ravni zrcali Z1 in Z2. Po odboju na Z1 in Z2 se delna snopa vrne na polprepustno zrcalo P, kjer se vsak od njiju spet razdeli na dva dela. S tem dobimo dva para vzporednih končnih snopov, ki sta na sliki označena kot izhod 1 in izhod 2. Snopa iz izhoda 2 gresta proti opazovalcu 0 in med seboj interferirata.

Polprepustno zrcalo P opišemo z amplitudno odbojnostjo  $r$  in prepustnostjo  $t$ , ki sta v splošnem kompleksni količini; če pa ni izgub, mora veljati  $|r|^2 + |t|^2 = 1$ . Končna delna snopa, ki prideta na izhod 2, imata enaki amplitudi, saj se vsak izmed njiju enkrat odbije na polprepustnem zrcalu P, enkrat pa je čezenj prepuščen.

Interferenčna slika je najenostavnejša, če na interferometer pošljemo ravno monokromatsko svetlobno valovanje s krožno frekvenco  $\omega$ , katerega električno polje zapišemo kot  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(kl - \omega t)$ , pri čemer  $\vec{E}_0$  označuje amplitudo,  $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$  valovni vektor valovanja,  $l = \int n(s) ds$  pa optično pot ( $n$  = lomni količnik). V praksi se takemu valovanju zelo dobro približamo s kolimiranim laserskim snopom. Električno polje svetlobe na opazovalnem zaslonu  $\vec{E}_z$  je vsota električnih polj končnih delnih snopov

$$\vec{E}_z = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{1}{2} \vec{E}_0 (\cos(kl_1 - \omega t) + \cos(kl_2 - \omega t)), \quad (1)$$

pri čemer  $l_1$  in  $l_2$  označujeta optično pot prvega oz. drugega delnega snopa, predfaktor  $\frac{1}{2}$  pa izvira iz privzetka, da nimamo izgub in je maksimalna amplituda na izhodu interferometra enaka vstopni amplitudi  $\vec{E}_0$ . Fazna razlika

$$\Delta\Phi = k(l_1 - l_2) \quad (2)$$

je odvisna od razdalj  $d_1$  in  $d_2$  med polprepustnim zrcalom P in ravnima zrcaloma Z1 oz. Z2 ter od debeline in lomnega količnika materialov, ki jih oba snopa svetlobe prečkata na poti od polprepustnega zrcala do obeh zrcal. (Za polprepustno zrcalo želimo simetrično strukturo, ki je v našem primeru v kocko staknjen par tako imenovanih 45 stopinjskih prizem, v stičišču pa je dielektrični sloj naparjen na eno izmed obeh prizem.) Intenziteta svetlobe na opazovalnem zaslonu je sorazmerna

$$I_z \propto \|\vec{E}_z\|^2 = \|\vec{E}_1\|^2 + \|\vec{E}_2\|^2 + 2|\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle| \quad (3)$$

in tako dobimo končni rezultat, da je

$$I_z = \frac{1}{2}I_0(1 + \cos \Delta\Phi), \quad (4)$$

pri čemer  $I_0$  označuje intenziteto vpadnega snopa. Kadar je fazni zaostanek enak celemu večkratniku periode  $\Delta\Phi = N2\pi$ , dobimo interferenčne maksimume (zaslon je najbolj svetel), kadar pa velja  $\Delta\Phi = (2N + 1)\pi$ , dobimo interferenčne minimume (zaslon je najbolj temen). Iz gornjega izraza zopet vidimo, da brez izgub v interferometru v primeru fazne razlike  $N2\pi$  vsa svetloba pride na en izhod interferometra. Fazna razlika med delnima snopoma na drugem izhodu je takrat taka, da tam pride do destruktivne interference.

Razliko optičnih poti delnih snopov  $\Delta l$  in s tem tudi fazni zaostanek  $\Delta\Phi$  lahko zvezno spreminjamo s pomikanjem ravnega zrcala Z1. Na zaslonu se pri tem izmenoma pojavljajo interferenčni maksimumi in minimumi. Vsakokrat, ko zrcalo Z1 premaknemo za razdaljo  $\Delta d_1 = \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda}{2}$  se optična pot prvega delnega snopa v zraku spremeni za  $\Delta l_1 = 2d_1 = \lambda$  in  $\Delta\Phi$  se poveča za  $2\pi$ ; interferenčna slika se torej ponovi.

Michelsonov interferometer ima posebno nastavitvev, ki ji pravimo ekvidistančna lega ogledal. Takrat je interferometer nastavljen popolnoma simetrično in sta optični poti snopov od polprepustnega ogledala do obeh zrcal in nazaj enaki in je fazna razlika enaka 0 za vse valovne dolžine. To pomeni, da dobimo v bližini ekvidistančne lege interferenčne minimume in maksimume hkrati za vse barvne komponente svetlobe. Zato vidimo blizu ekvidistančne lege interferenco tudi z belo svetlobo, kar je soroden pojav kot interferenca na tanki plasti, npr. na oljnem madežu.

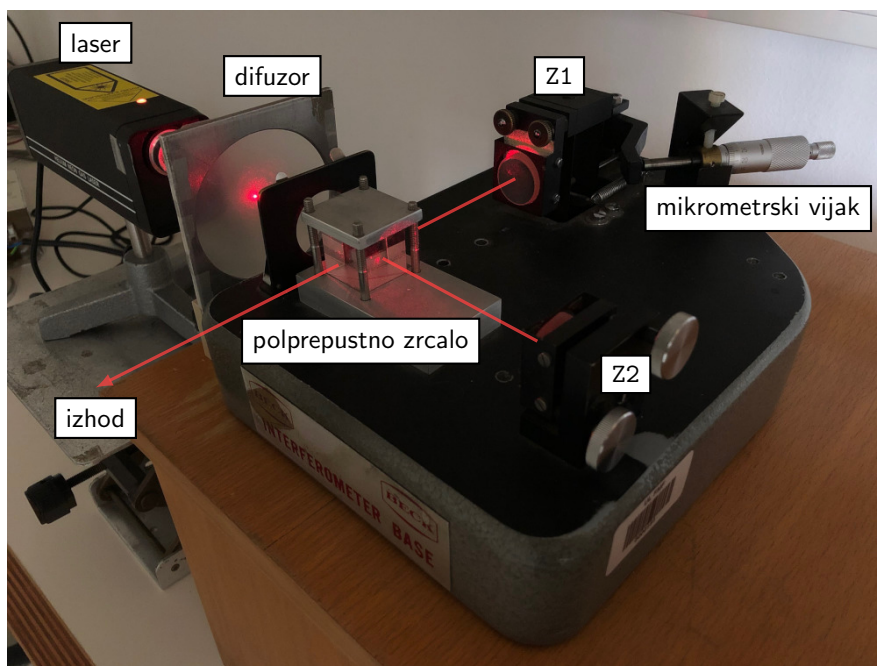
Michelsonov interferometer je od svoje prvotne konstrukcije (A.A. Michelson, 1881) do današnjih dni doživel številne variacije in nadgradnje. Z njim je bilo pokazanih nekaj za fizikalno znanost zgodovinsko pomembnih eksperimentov, med katerimi je najbolj znan Michelson-Morleyev eksperiment, s katerim so ovrgli hipotezo o obstoju vse-obdajajočega etra [2]. Danes se Michelsonovi interferometri uporabljajo za precizno merjenje dolžin in lomnih količnikov, z njimi kontroliramo majhne napake na različnih optičnih komponentah, uporabljamo ga v visoko ločljivi infra-rdeči spektroskopiji (Fourierova spektroskopija), itd.

## Opis instrumenta

Na kovinski nosilni plošči so pritrjeni deli interferometra: polprepustno zrcalo P (angl. beamsplitter cube) ter ravni zrcali Z1 in Z2 (slika 1). Lastnosti Michelsonovega interferometra so simetrične glede na ravnino ogledala in ima zato dva enakovredna vhoda in izhoda. Izberemo en vhod, ki ga osvetljujemo s svetilom L. Lastnosti svetila lahko dodatno spreminjamo z lečami ali pa na vstopni strani med svetilo in polprepustno zrcalo namestimo še difuzno mlečno steklo D. Zrcalo Z1 je nameščeno na pomičnem nosilcu. Premikamo ga z mikrometrskim vijakom M preko prenosnega mehanizma, ki premik zreducira približno v razmerju 1:5 (če mikrometrski vijak premaknemo za  $100\ \mu\text{m}$ , se torej zrcalo Z1 premakne le za okoli  $20\ \mu\text{m}$ ). Nastavitev zrcala Z2 spreminjamo z dvema justirnima vijakoma.

## Potrebščine

- Michelsonov interferometer
- He–Ne laser z valovno dolžino  $\lambda = (632.8 \pm 0.1)\ \text{nm}$
- zračna komora z manometrom in zračna tlačilka
- Hg svetilka in volframska žarnica v istem ohišju
- Na svetilka
- mlečno steklo, difuzor iz belega papirja



**Slika 2:** Postavitev Michelsonovega interferometra osvetljenega z laserjem.

## Naloga

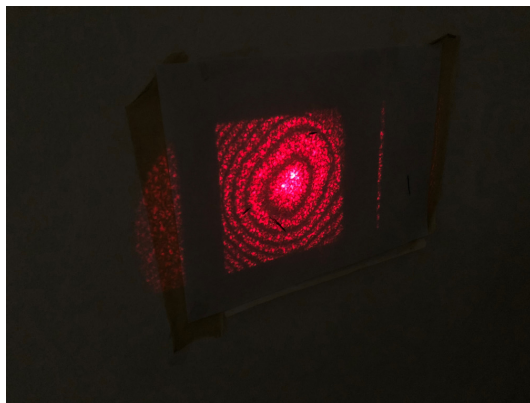
1. Z laserjem naravnaj interferometer ter umeri pomik zrcala Z1 v odvisnosti od nastavitve mikrometrskega vijaka.
2. Izmeri lomni količnik zraka v odvisnosti od zračnega tlaka.
3. Poišči ekvidistančno lego interferometra.
4. Izmeri koherenčno dolžino bele svetlobe iz žarnice na volframsko žarilno nitko.
5. Izmeri valovni dolžini Na dubleta.

## Navodilo



**Nikoli ne glej direktno v laserski žarek, ker si s tem lahko poškoduješ oči!**

**A.** Naravnaj He–Ne laser, da sveti v sredino polprepustnega ogledala in v sredino obeh zrcal. Pot snopov v interferometru lahko opazujemo z robom belega papirčka, ki ga zaporedoma postavljamo na različna mesta v interferometru. Pri poljubni naravnosti zrcal Z1 in Z2 dobimo na izhodu v splošnem dva snopa, ki ju lahko opazujemo na steni laboratorija. Tam dobimo dve med seboj razmaknjeni svetli "lisi", ki ju nato z nagibanjem zrcala Z2 med seboj prekrijemo. Najprej vrtimo prvi justirni vijak, dokler lisi nista poravnani npr. vodoravno, nato pa še drugega. Ko se lisi začneta prekrivati, se pojavijo interferenčne proge, slika 3.



**Slika 3:** Interferenčne proge opazujemo na zaslonu (steni).

Zrcali Z1 in Z2 sta medsebojno poravnani takrat, ko je celotno interferenčno polje čimbolj homogeno osvetljeno. S premikanjem mikrometrskega vijaka, ki spreminja oddaljenost zrcala Z1 od polprepustnega zrcala P, se svetlost interferenčne slike izmenično spreminja. Če poznamo valovno dolžino vpadne svetlobe  $\lambda$ , lahko s štetjem zaporednih interferenčnih minimumov zelo precizno merimo premike zrcala Z1.

Štetje interferenčnih prog je lažje, če vidimo večji del slike in več interferenčnih prog. Ena od možnosti je, da postavimo med laser in interferometer mlečno steklo, ki del svetlobe razprši. Interferenčno sliko opazujemo na steni v zatemnjenem laboratoriju. V primeru dobro nastavljenega interferometra vidimo interferenčne proge v obliki krogov.

Pri pomikanju zrcala Z1 proge izginjajo ali se pojavljajo, odvisno od smeri premika. Vsaka izginula proga pomeni, da se je zrcalo Z1 premaknilo za  $\frac{\lambda}{2}$ .

Mikrometrski vijak, ki pomika zrcalo, postavi približno na sredino pomičnega območja in odčitaj njegovo lego. Nato ga vrti in šteje proge toliko časa, da izgine najmanj 100 interferenčnih prog. Spet odčitaj lego na mikrometrski skali. Meritev ponovi vsaj petkrat. Zaradi možne mehanske histereze (mrtvi hod) vijaka izvedi premike vedno v isti smeri in med štetjem ne vrti vijaka nazaj. Iz meritev natančneje določi delilno razmerje pomičnega mehanizma.

**B.** Med polprepustno zrcalo P in pomično zrcalo Z1 pritrdi zračno komoro dolžine  $(50 \pm 1)$  mm, slika 4. Komoro na obeh straneh zapirata stekleni okni, ki sta med seboj vzporedni. Preveri nastavitve interferometra in ga po potrebi ponovno justiraj, tako da na steni vidiš interferenčne proge. Razliko med zračnim pritiskom v komori in v okolici mериmo z manometrom. S tlačilko lahko povečamo tlak v komori za približno 2 bar. Z ventilom pa lahko tlak kontrolirano nižamo. Povišaj tlak v komori za okoli 2 bar. Z zniževanjem pritiska se spreminja lomni količnik zraka v komori in s tem tudi optična pot  $l_1$  prvega delnega snopa. Na zaslonu se zato izmenjujejo interferenčni maksimumi in minimumi oz. se pomikajo interferenčne proge. Šteje izginevanje interferenčnih prog v čim širšem intervalu spremembe tlaka. Meritev števila prog v odvisnosti od tlačne razlike ponovi vsaj petkrat. Vsaka izginula proga pomeni, da se je optična pot  $l_1$  spremenila za  $\lambda$ . Pazi, svetloba potuje dvakrat skozi komoro. Iz znane dolžine celice lahko izračunamo ustrezno spremembo lomnega količnika zraka  $\Delta n$  kot funkcijo tlaka. Glede na to, da je lomni količnik vakuumu 1, lahko na osnovi meritev za zrak narišemo diagram  $n - 1$  kot funkcijo absolutnega tlaka  $p$ . Vprašanje: Kolikšen bi bil lomni količnik zraka pri 1000 bar? Ali je primerljiv z lomnim količnikom vode?



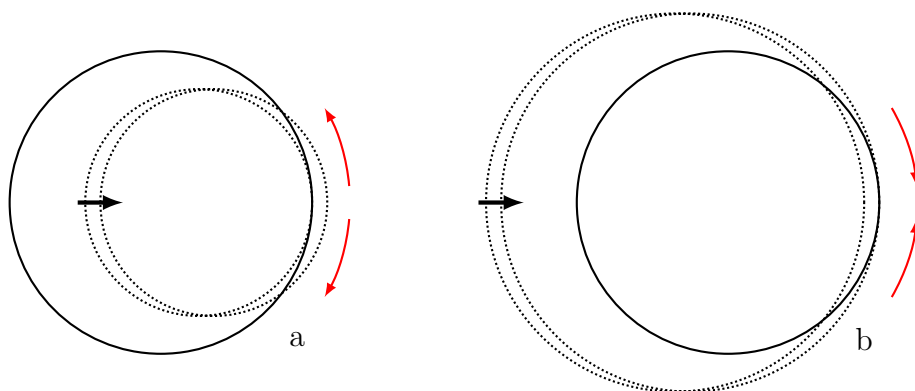
**Slika 4:** Interferometer z zračno komoro.

**C.** Metoda iskanja ekvidistančne lege je naslednja. Za osvetljevanje uporabimo Hg svetilko in mlečno steklo. Osvetlitev interferometra je sedaj tako šibka, da lahko z očesom gledamo naravnost v interferometer. V splošnem vidimo barvne ukrivljene interferenčne proge. Z nastavitvijo ogledala Z2 dosežemo, da vidimo sliko, ki jo sestavljajo barvni interferenčni koncentrični krogi. Premaknemo ogledalo Z1 v eno skrajno lego, kjer smo daleč od ekvidistančne lege in potem med počasnim pomikanjem zrcala Z1 proti sredini opazujemo, kaj se dogaja z interferenčnimi progami (krogi). Krogi lahko izginevajo v sredini ali pa rastejo iz sredine. Če smo postavili ogledalo Z1 najbližje polprepustnemu ogledalu, potem bodo krogi izginevali, ko bomo odmikali Z1. Zapomnimo si, kaj se dogaja in potem z vrtenjem premaknemo vijak za nekaj mm. Ponovno počasi in v isti smeri premikamo ogledalo Z1 in opazujemo, če proge še vedno izginjajo.

Premik za nekaj mm in opazovanje izginjanja krogov ponavljamo toliko časa, da premaknemo Z1 preko ekvidistančne lege, kar se pokaže v tem, da takrat krogi nastajajo. Sedaj začnemo vrteti vijak nazaj in opazujemo kroge, ki izginjajo. Krogi so vse manj pravilni, ker se v bližini ekvidistančne lege neravnost ogledal in polprepustnega zrcala bolj pozna. Če napak ogledal ne bi bilo, bi morali v ekvidistantni legi videti celo polje temno ali svetlo.

Ko smo prepričani, da smo v bližini ekvidistančne lege, spremenimo način opazovanja. Najprej nagnemo ogledalo Z2 toliko, da v vidnem polju nimamo več krogov (popačenih v lise) ampak približno deset prog. Sedaj ugasnemo Hg svetilko in prižgemo volframsko, ki je v istem ohišju. Običajno bo interferenčni vzorec izginil, ker s prejšnjim postopkom nismo natančno zadeli ekvidistančne lege. Zapišemo si položja mikrometrskega vijaka. Sedaj previdno vrtimo vijak in premikamo zrcalo Z1 v okolici začetne lege, dokler ne zagledamo belo-črnih interferenčnih prog. Takrat smo našli ekvidistančno lego. Zapišite si lego vijaka.

Nastanek interferenčnih kolobarjev najlažje razumemo v primeru, da interferometer na vhodu osvetljujemo s točkastim svetilom. Valovne fronte točkastega svetila so krogle, njihova ukrivljenost pa pada z oddaljenostjo od svetila. Poti svetlobe od izvora do ogledal Z1 in Z2 ter do izhoda interferometra se v splošnem razlikujeta in zato sta različni tudi ukrivljenosti valovnih front. Presečišča valovnih front različne ukrivljenosti so krogi, zato imajo interferenčne proge obliko krogov. Krogi so tem bolj gosti, čim bolj sta ukrivljenosti različni, izginejo pa v ekvidistančni legi, ko se ukrivljenosti valovnih front izenačita. Pri opazovanju interference z očesom in difuzorjem na vhodu interferometra je slika ekvivalentna zgornji razlagi, če je oko izostreno na gledanje v neskončnost. Preizkusite sami, kako se slika spreminja v odvisnosti od akomodacije očesa. Razlaga pa presega zahteve te vaje.



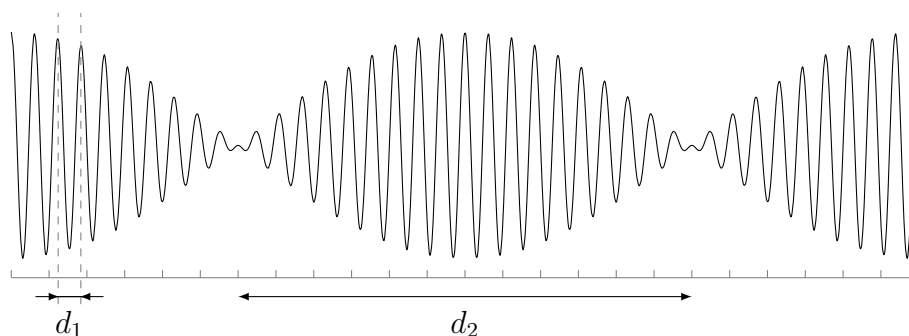
**Slika 5:** Točkast izvor vidimo na izhodu Michelsonovega interferometra dvojno. Na sliki so shematično prikazane valovne fronte teh dveh koherentnih točkastih svetil, od celotnih krogelnih front pa opazujemo le desno stran, tam kjer se narisane valovne fronte sekajo. Prvo svetilo naj miruje (svetloba se odbije od fiksnega ogledala), ena njegova valovna fronta pa je narisana s polno črto. Drugo svetilo je v primeru a bližje opazovalcu, zato je njegova valovna fronta, narisana pikčasto, bolj ukrivljena. V primeru b je drugo svetlo bolj oddaljeno od opazovalca kot prvo svetilo. Drugo svetilo premikamo proti desni v smeri puščice (premično ogledalo bližamo izhodu), kar je na sliki predstavljeno z dvema valovnima frontama, ki ustrezata dvema legama drugega svetila. Vidimo, da bodo v primeru a nastajale interferenčne proge v sredini in se širile navzven, v primeru b pa bodo izginjevale v centru interferenčnega vzorca.



**D.** Vidnost interferenčne slike je odvisna od koherenčnih lastnosti svetlobnega izvora. V grobem ločimo časovno in prostorsko koherenco in Michelsonov interferometer je primeren za določanje časovne koherence, čeprav kot rezultat pogosto navajamo koherenčno dolžino, ki je produkt koherenčnega časa in svetlobne hitrosti v vakuumu. Koherenčni čas  $\tau_k = 1/\Delta\nu$  je enak obratni vrednosti spektralne širine svetila. Pri HeNe laserjih je koherenčna dolžina velika in interferenčne kolobarje dobimo tudi, če sta zrcali relativno razmaknjeni za več deset centimetrov. Pri kvazi-monokromatskih virih svetlobe, kot je denimo Hg svetilka, je zgornja meja za  $d$  reda velikosti nekaj cm. Pri termičnih svetilih, med katere spada običajna žarnica na volframsko nitko, pa je koherenčna dolžina le še nekaj valovnih dolžin in interferenčno sliko dobimo le, če je razdalja  $d$  manjša od nekaj  $\mu\text{m}$ . Zato je s svetlobo iz žarnice zelo težko "najti" ekvidistančno lego interferometra in opazovati interferenčno sliko.

Koherenčni čas ocenimo z Michelsonovim interferometrom tako, da iz ekvidistančne lege, kjer je kontrast interferenčnih prog maksimalen, premaknemo ogledalo Z1 do tja, kjer ocenimo, da se je kontrast zmanjšal na polovico. Pri volframski žarnici je spekter tako širok, da namesto premikanja zrcala Z1, Z2 zrcalo le nagnemo, da vidimo v polju več kot 10 svetlo temnih prog in preštejemo proge od najbolj kontrastne do proge, kjer se kontrast zmanjša na polovico. Štejemo na obe strani. Iz števila prešteti prog  $m$  ocenimo koherenčno dolžino kot  $m\bar{\lambda}$ , kjer je  $\bar{\lambda} = 550\text{ nm}$  povprečna valovna dolžina bele svetlobe iz žarnice.

**E.** V svetlobnem spektru Na svetilke sta dve črti v oranžnem barvnem področju, ki sta relativno blizu druga zraven druge (dublet). V ekvidistančni legi, kot vedno, vidimo velik kontrast interferenčnih prog. Pri premikanju zrcala Z1 opazimo v kontrastu interferenčne slike "utripanje", glej sliko 6



**Slika 6:** Interferenčni vzorec dveh ozkih črt. Ko seštejemo intenziteti obeh črt, dobimo maksimalen kontrast tam, kjer se interferenčne proge pokrivajo, kontrast pa izgine, ko so proge med seboj zamaknjene za pol periode. Tako merimo razdaljo med progami  $d_1$  kot tudi razdaljo med pobledivami  $d_2$ .

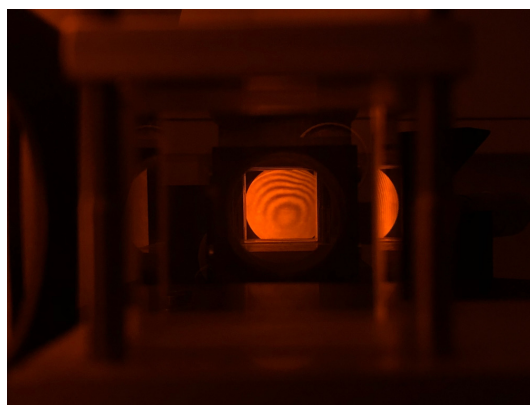
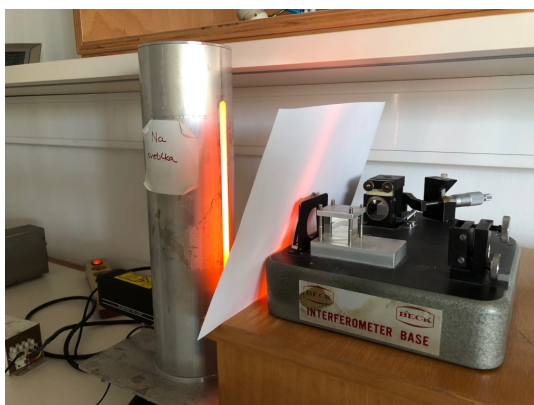
To utripanje je lahko razumeti, saj vsaki ozki črti pripadajo enakomerno razmaknjene interferenčne proge, vendar je perioda vzorca različna za prvo in drugo črto. Svetlobo v teh dveh črtah lahko obravnavamo kot dva nekoherentna izvora. Ko seštejemo intenziteti obeh črt, dobimo maksimalen kontrast tam, kjer se interferenčne proge pokrivajo, kontrast pa izgine, ko so proge med seboj zamaknjene za pol periode. Intenziteto na

izhodu interferometra opisuje naslednja enačba:

$$I = \frac{I_0}{4} [2 + \cos(2k_1d) + \cos(2k_2d)] = \frac{I_0}{2} [1 + \cos((k_1 + k_2)d) \cos((k_1 - k_2)d)], \quad (5)$$

kjer sta  $k_1$  in  $k_2$  valovni števili obeh črt in je  $d$  odmik ogledala iz ekvidistančne lege. Produkt obeh  $\cos$  v drugem delu enačbe nam da dobro znano utripanje. Prvi člen z vsoto  $k_1 + k_2$  opisuje hitro izmenjavo temnih in svetlih prog, drugi člen z razliko  $k_1 - k_2$  pa počasno spreminjanje kontrasta.

Vključi Na svetilko in jo postavi pred interferometer. Počakaj nekaj minut, da se svetilka segreje in začne oddajati močno oranžno svetlobo. Med svetilko in interferometer postavi še nosilec z listom belega papirja ali kakšno drugo difuzno snov, slika 7. Zrcalo Z1 postavi v ekvidistantno lego in šteje proge pri odmikanju od te lege. Večkrat preštej po 100 prog in zapiši premik zrcala. S to meritvijo iz  $(k_1 + k_2)d_{100} = 100 \times 2\pi$  določiš povprečno valovno dolžino obeh črt  $\bar{\lambda} = 2d_{100}/100$ , kjer smo upoštevali, da je razlika valovnih dolžin majhna.



**Slika 7:** (levo) Med Na svetilko in prizmo postavimo bel papir in opazujemo interferenčno sliko (desno).

Nato opazuj spreminjanje kontrasta interferenčne slike, ko zrcalo odmikaš za večje odmike. Zapiši položaje mikrometrskega vijaka, ki ustrezajo 1, 2 ... 5 zabrisanjem (pobleditvam) kontrasta. (Pobleditve lahko natančneje določimo kot pa maksimalen kontrast.) Pri meritvah zrcalo Z1 pomikaj vedno v isto smer. Razdalja med dvema pobleditvama  $d_2$  je določena z  $(k_1 - k_2)d_2 = \pi$ . Od tod izračunamo razliko valovnih dolžin  $\Delta\lambda = \bar{\lambda}^2/(2d_2)$ .

## Literatura

- [1] Janez Strnad. *Fizika, 2. del: Električna in Optika*. DMFA, 2018.
- [2] Janez Strnad. *Fizika, 3. del: Posebna teorija relativnosti, Kvantna fizika, Atomi*. DMFA, 2018.