

DETEKCIJA NEVIDNIH INTERFERENČNIH SLIK Z MICHELSONOVIM INTERFEROMETROM

IVO VEROVNIK

Zavod Republike Slovenije za šolstvo
Ljubljana

in

ANDREJ LIKAR

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

PACS: 07.50.Hp, 01.65.+g

Pri poskusih z Michelsonovim interferometrom so interferenčne proge vidne s polnim kontrastom le, če sta kraka interferometra enako dolga. Z večanjem razlike dolžin krakov se kontrast interferenčnih prog manjša in te popolnoma izginejo pri razlikah, ki so znatno večje od koherenčne dolžine uporabljenе svetlobe. Če za detekcijo svetlobe uporabimo senzorje, ki se dovolj hitro odzivajo na njene spremembe, lahko izmerimo razmike med sicer nevidnimi interferenčnimi progami tudi pri velikih razlikah dolžin krakov interferometra. Predstavljen je eksperiment, ki sva ga načrtovala in izvedla, didaktični modeli ter orodja za razlagovo pojava.

DETECTION OF INVISIBLE INTERFERENCE PATTERNS USING MICHELSON INTERFEROMETER

In experiments with Michelson interferometer the interference pattern can be seen at full contrast in case of equidistant position of the both mirrors. When the difference of the lengths of both arms increases, the contrast fades away due to incoherence of light and the pattern diminishes completely when the difference is substantially bigger than the coherence length of the light. When using fast enough detectors, the distance between invisible interference fringes can be detected even at large difference of the length of the interferometer arms. The experiment, which we carried out, and the didactical models and tools to explain the phenomenon are presented.

1. Uvod

Pri obravnavi interferenčnih pojavov s svetlobo v šoli poudarimo, da se interferenca pojavi le, kadar sestavljamo dva koherentna snopa svetlobe. Z razmeroma skromno eksperimentalno opremo, dosegljivo tudi šolskim laboratorijem, lahko pokažemo, da interferenčni pojavi nastanejo tudi pri uporabi nekoherentnih virov svetlobe. Prve eksperimente te vrste, ki so po svoji naravi sorodni z interferenco svetlobe po prehodu skozi dvojno režo, sva že

opisala v nekaterih člankih [1 do 4]. Poročila o drugačnih eksperimentih, ki opisujejo interferenco svetlobe iz nekoherentnih virov, pa najdemo tudi v člankih drugih avtorjev [5 in 6]. V nadaljevanju bova opisala način, kako lahko z uporabo Michelsonovega interferometra opazujemo in merimo interferenčne slike, dobljene z nekoherentnimi snopi svetlobe. Pri tem je ugodno predvsem to, da z Michelsonovim interferometrom razmeroma preprosto nadziramo ključne eksperimentalne parametre. Namesto tehniških podrobnosti eksperimenta, ki jih lahko najdemo v članku [7], bodo tu predstavljene predvsem didaktične rešitve in orodja za razlagu tega pojava.

Kontrast interferenčnih slik, ki jih dobimo z Michelsonovim interferometrom, je odvisen od dolžine njegovih krakov. Poln kontrast dosežemo, ko sta zrcali kraka postavljeni simetrično glede na polprepustno zrcalo. Če dolžini krakov nista enaki, se pri večanju njune razlike zmanjšuje kontrast interferenčne slike. Interferenčna slika se popolnoma zabriše, ko je razlika dolžin krakov mnogo večja od koherenčne dolžine uporabljenе svetlobe.

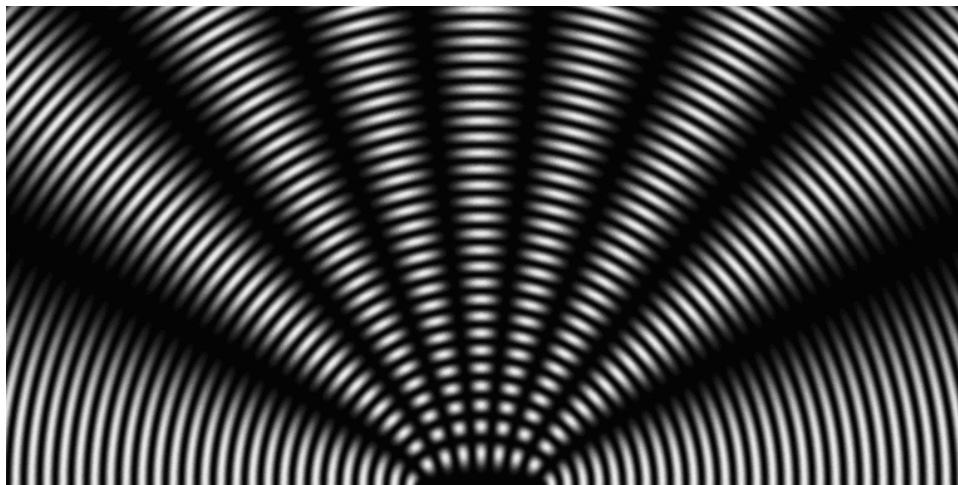
Obstaja dokaj splošno prepričanje, da je v primeru popolnoma zabrisane interferenčne slike izgubljena tudi vsa informacija o interferenčnih progah, npr. tudi o njihovi medsebojni razdalji, ki je pogosto pomemben podatek pri meritvah z Michelsonovim interferometrom. Da to ne drži, bova pokazala, da lahko izmerimo razmike med interferenčnimi progami tudi v popolnoma zabrisani interferenčni sliki.

Pojav sam in rezultate meritev podrobno pojasnimo z uporabo relativno zapletenih matematično-fizikalnih izpeljav. To je seveda nujno, ko želimo natanko opisati eksperiment. Pri tem je za boljše razumevanje koristno, če razlago podpremo z gradivi, ki omogočajo boljšo vizualno predstavo o dogajanju med izvajanjem eksperimenta. Še posebej je to pomembno, ko gre za zapleteno sočasno časovno in prostorsko spreminjanje fizikalnih količin, ki so ključne za izid eksperimenta. Včasih se lahko zadovoljimo tudi s tem, da študenti na kvalitativni ravni razumejo dogajanje in izid eksperimenta, ne da bi se jim bilo treba prebijati skozi zahtevne izpeljave. V takih primerih si lahko pomagamo z mehanskimi analogijami eksperimenta, ki jih lahko s čutili neposredno zaznavamo, ali pa uporabimo ustrezne računalniške simulacije in animacije. V nadaljevanju bodo predstavljene nekatere take rešitve, ki omogočajo razumevanje izida našega eksperimenta.

2. Zvočni ekvivalent eksperimenta z dvojno režo

Kot primer, ki bo podprl razumevanje našega eksperimenta z Michelso-novim interferometrom, vzemimo najprej zvočni ekvivalent uklona in inter-fERENCE svetlobe po njenem prehodu skozi dvojno režo.

Dva zvočnika, ki sta drug od drugega oddaljena okoli enega metra, pri-klučimo na tonski generator s sinusnim signalom frekvence okoli 800 Hz. V tem primeru dobimo interferenco, pri kateri lahko slušno zaznavamo podro-čja ojačitev in oslabitev preprosto tako, da se premikamo po prostoru pred zvočnikoma. Eksperiment spremenimo tako, da na en zvočnik priključimo signal s frekvenco 800 Hz, na drugega pa signal z nekoliko višjo frekvenco, denimo 801 Hz. Če pred izvedbo tega eksperimenta vprašamo študente, kaj bodo slišali, lahko v večini primerov pričakujemo pravilen odgovor - utri-panje s frekvenco 1 Hz. Nadaljujemo lahko z dodatnim vprašanjem, ki se nanaša na energijo zvoka: Kam gre energija zvoka ob trenutkih tišine, med-tem ko poslušamo utripanje zvoka? Odgovor na to vprašanje ni preprost.



Slika 1. Trenutna slika animacije, ki prikazuje obračanje interferenčnega polja, če se frekvenci zvoka iz zvočnikov na spodnjem robu slike (nista prikazana) nekoliko razlikujeta.

Ob razlagi pomena relativnih faz dveh izvirov valovanja uporabimo ani-macijo interferenčnega polja pred zvočnikoma, ki pripomore k razumevanju tega pojava. Pri različnih frekvencah se celotno interferenčno polje obrača v določeno smer, tako da se v katerikoli izbrani točki v prostoru pred zvočni-koma energijski tok zvočnega polja spreminja s periodo, ki je enaka frekvenci

utripanja, v našem primeru s frekvenco 1 Hz (slika 1).

3. Eksperiment z dvojno režo in Michelsonov interferometer

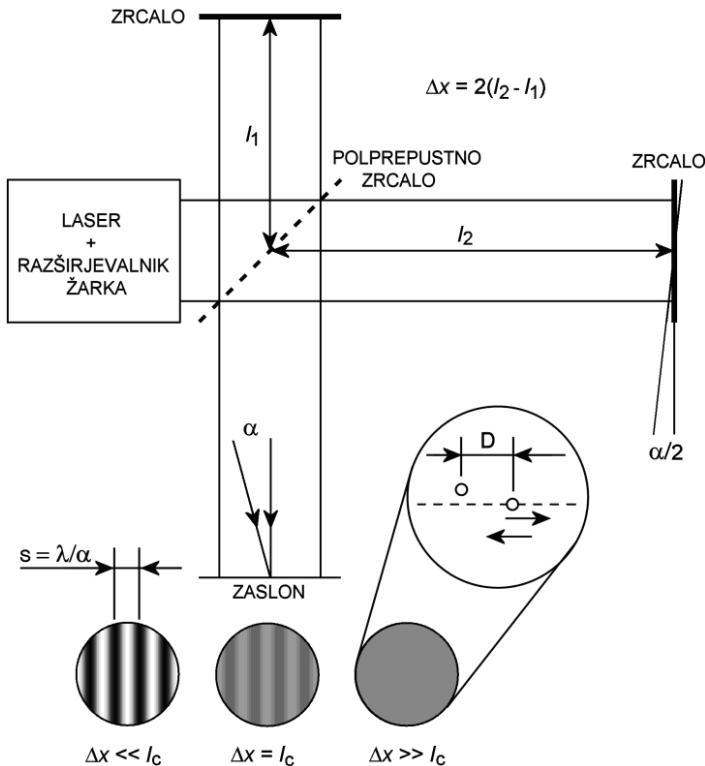
Pri razlagi originalnega eksperimenta z dvojno režo, imenovanega tudi po avtorju kot Youngov eksperiment, je treba poudariti pomen konstantne fazne razlike svetlobnega valovanja iz obeh rež, ki zagotavlja statično interferenčno sliko. Reži namreč osvetljuje en sam, ustrezzo majhen izvir svetlobe. Če namesto dveh rež vzamemo dva neodvisna svetlobna izvira, se relativna fazna razlika obeh izvirov naključno spreminja. To ima za posledico naključne spremembe lege interferenčnega polja. Senzorji, ki se počasi odzivajo na spremembe energijskega toka svetlobe, kot je npr. naše oko, ne morejo zaznavati hitrih sprememb interferenčne slike, tako da je zaslon videti enakomerno osvetljen. Hitri senzorji, kot so npr. polprevodniške fotodiode, pa lahko pri ustreznih pogojih registrirajo svetlobne fluktuacije.

Uporabila sva Michelsonov interferometer, ki omogoča relativno preprosto kontrolo parametrov, ki določajo lastnosti interferenčne slike. Dekoherenco dveh svetlobnih snopov, ki ju pri Michelsonovem interferometru dobimo s pomočjo polprepustnega zrcala, dosežemo s povečanjem dolžine enega od krakov interferometra tako, da je razlika svetlobnih poti iz obeh krakov mnogo večja od koherenčne dolžine svetlobe. Kot svetlobni izvir smo v našem eksperimentu uporabili polprevodniški laser, ki oddaja rdečo svetobo valovne dolžine 660 nm.

Relativna faza obeh svetlobnih snopov se na zaslonu, kjer opazujemo interferenčno sliko, sedaj zelo hitro naključno spreminja, kar povzroča zelo hitro spremjanje lege interferenčnih prog. S prostim očesom ne vidimo interferenčne slike, saj je zaradi hitrih naključnih premikov popolnoma zbrisana.

4. Merjenje svetlobnih fluktuacij z dvema senzorjem

Namesto enega samega hitro odzivnega senzorja, ki lahko meri naključne spremembe energijskega toka svetlobe, uporabimo dva senzorja. V tem primeru je stopnja korelacije izmerjenih signalov iz obeh senzorjev odvisna od njune medsebojne razdalje. Ta medsebojna odvisnost omogoča neposredno določitev razdalje med za oko nevidnimi interferenčnimi progami. Slika 2 prikazuje postavitev eksperimenta.

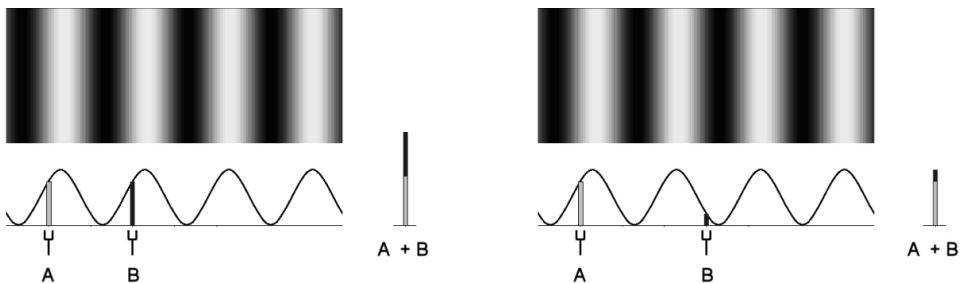


Slika 2. Razširjeni laserski snop svetlobe z valovno dolžino λ obravnavamo kot ravno valovanje. Na zaslunu interferometra svetlobni valovanji iz obeh krakov interferirata, tako da nastanejo vzporedne interferenčne proge v medsebojni razdalji λ/α , kjer je α kot med obema snopoma svetlobe. Kontrast interferenčne slike izginja z večanjem razlike dolžin krakov interferometra in popolnoma izgine pri razliki dolžin, ki so mnogo večje od koherenčne dolžine svetlobe l_c . Informacijo o medsebojni razdalji interferenčnih prog dobimo z merjenjem fluktuacij seštetega signala iz dveh senzorjev v medsebojni razdalji D .

5. Animacija kot pomoč pri razlagi delovanja fluktuacijskega interferometra

Ker si je sočasno spremišjanje več količin med meritvijo relativno težko predstavljati, si pri razlagi lahko pomagamo z animacijo. Ta ponazarja spremišjanje seštetega signala iz dveh senzorjev pri različnih medsebojnih razdaljah, medtem ko se lega interferenčnih prog spreminja. Pripravila sva dve animaciji, kjer sta senzorja v dveh ekstremnih legah glede na velikost fluktuacij (slika 3).

Animaciji nazorno pojasnjujeta velikost seštetega signala iz dveh sen-



Slika 3. Seštevanje signalov dveh senzorjev: trenutni slike dveh animacij, pri katerih se interferenčna slika skupaj z diagramom na spodnjem delu enakomerno premika proti desni. Senzorja A in B v obeh primerih ostajata na istih mestih. Višina črt nad senzorjem kaže trenutno velikost izmerjenih signalov. Levo: Razdalja med senzorjema je enaka razdalji med sosednjimi interferenčnimi progami. Seštevi signal $A + B$ v tem primeru maksimalno fluktuirja. Desno: Razdalja med senzorjema je enaka poldrugi razdalji med sosednjimi interferenčnimi progami. Seštevi signal je v tem primeru konstanten.

zorjev v odvisnosti od njune medsebojne razdalje. Levi del slike 3 prikazuje razmere, ko dobimo največje fluktuacije seštetega signala. Razdalja med senzorjema A in B , ki med meritvijo ostajata na istih mestih, je enaka razdalji med sosednjimi interferenčnimi progami. V animaciji se interferenčni vzorec enakomerno premika v desno skupaj z diagramom, ki prikazuje osvetljenost zaslona. Črti nad senzorjem kažeta velikost izmerjenih signalov, ki se v tem primeru sinhrono periodično spreminja od nič do maksimalne vrednosti. Vsota obeh signalov $A+B$ se zaradi tega spreminja od nič do dva-kratne maksimalne vrednosti signala enega senzorja. Fluktuacije seštetega signala so v tem primeru maksimalne. Enake fluktuacije dobimo pri vsaki razdalji med senzorjema, ki je enaka večkratniku razdalje med sosednjimi interferenčnimi progami.

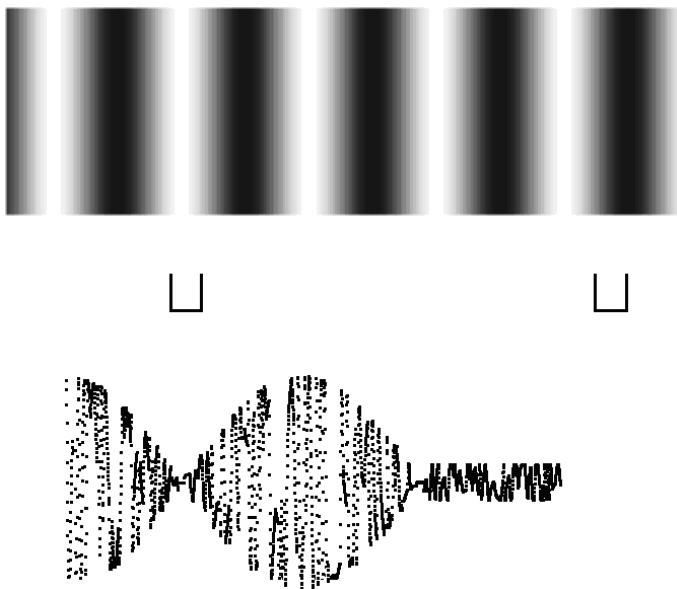
Desna stran slike 3 prikazuje podobno situacijo kot leva, le da je tu razdalja med senzorjema enaka poldrugi razdalji med sosednjimi interferenčnimi progami. Sedaj spremenjanje signalov iz senzorjev ni več sinhrono. Ko izmeri senzor A maksimalno vrednost, je velikost signala senzorja B enaka nič in obratno. Če velikost signala iz enega senzorja narašča, signal iz drugega senzorja v enaki meri pada. Seštevi signal $A + B$ se ne spreminja in je po velikosti enak maksimalni vrednosti signala iz enega senzorja. Konstanten signal oz. signal z minimalnimi fluktuacijami dobimo vedno v primerih, ko je razdalja med senzorjema enaka lihemu večkratniku polovične razdalje med sosednjimi interferenčnimi progami.

S senzorji, ki lahko sledijo spremembam energijskega toka svetlobe v

interferenčni sliki, izmerimo različno amplitudo fluktuacij seštetih signalov pri različnih medsebojnih razdaljah senzorjev. Povprečna vrednost sešte-tega signala v vseh primerih ostaja enaka, ne glede na medsebojno razdaljo senzorjev. Z merjenjem velikosti fluktuacij lahko torej določimo medsebojno razdaljo med interferenčnimi progami v hitro se premikajočih interferenčnih vzorcih. Ta razdalja je preprosto enaka spremembji dveh zaporednih razdalj med senzorjem, kjer izmerimo maksimalne ali minimalne fluktuacije.

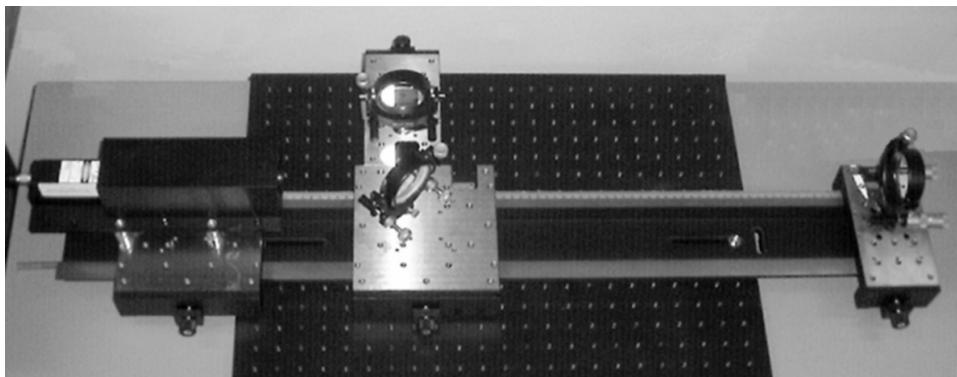
6. Simulacija meritev pri naključnih spremembah relativnih faz svetlobnih snopov

Interaktivno računalniško simulacijo meritev lahko izdelamo tako, da je po vsebini še korak bliže pravemu laboratorijskemu eksperimentu. Slika 4 kaže posnetek dela računalniškega zaslona s programom, ki simulira velikost seštetih signalov iz dveh senzorjev pri naključnem spremenjanju relativnih faz dveh svetlobnih valovanj. Pri tem lahko razdaljo med senzorjem zvezno spremojamo s pritiskanjem tipke na tipkovnici. Sešteti signal se sproti izrisuje na spodnjem delu računalniškega zaslona.



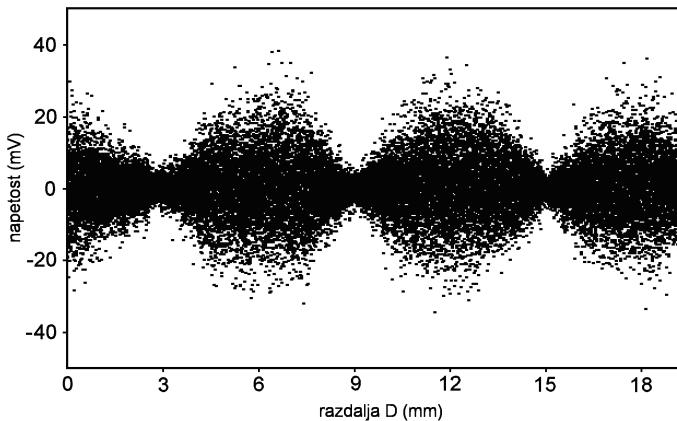
Slika 4. Interaktivna animacija z naključno premikajočo se interferenčno sliko. Razdaljo med senzorjem (na sredini slike) lahko nastavljamo s pomočjo tipkovnice računalnika. Izmenična komponenta seštetega signala se izrisuje na spodnjem delu zaslona.

7. Eksperiment



Slika 5. Fotografija postavitve eksperimenta, ki je shematično prikazan na sliki 2.

Eksperiment s tehniškimi detajli je pojasnjen v objavljenem članku [7], zato ga tu v podrobnostih ne opisujeva. Shematično je njegova postavitev prikazana na sliki 2, fotografija interferometra pa na sliki 5. Najpomembnejši pa je rezultat meritve, ki je reproduciran na sliki 6. Podobnost dobljenih rezultatov meritev z rezultatom interaktivne animacije na sliki 4 je očitna.



Slika 6. Velikost fluktuacij izmerjenega signala se periodično spreminja z naraščajočo razdaljo D med svetlobnima senzorjem – fotodiodama. Perioda (okoli 6 mm) je enaka razdalji med begajočimi (nevidnimi) interferenčnimi progami.

8. Sklep

Eksperiment in predstavljena multimedijijska didaktična gradiva imajo namen osvetliti možnosti izvedbe in razlage interferenčnih poskusov z nekoherentnimi svetlobnimi izviri. Opisani pojav dodatno opisuje lastnost svetlobe, ki v različnih okoliščinah kaže svojo bodisi delčno ali pa valovno naravo. Delčne lastnosti svetlobe se izražajo pri interakciji svetlobe s snovjo, pri njeni emisiji in absorpciji. V prostoru med izvirom svetlobe in mestom absorpcije pa se svetloba vede kot valovanje, kjer se elektromagnetno polje, tudi tako, ki ga prispevajo različni fotoni, sestavlja po načelu superpozicije. Eksperimente, ki so sorodni zgoraj opisanemu, sva namreč izvedla tudi s svetlobo dveh neodvisnih laserjev [1 do 4]. Poskusi te vrste napoljujejo študente na razumevanje delovanja zelo dolgih velikih Michelsonovih interferometrov, ki jih gradijo za zaznavanje gravitacijskega valovanja in intenzitetnega zvezdnega interferometra.

LITERATURA

- [1] I. Verovnik in A. Likar, *Fluktuacijski interferometer*, Obzornik mat. fiz. **34** (1987) 3, str. 79–86.
- [2] I. Verovnik in A. Likar, *A fluctuation interferometer*, Am. J. Phys. **56** (1988), str. 231–234.
- [3] I. Verovnik in A. Likar, *Continuous fluctuation interferometer*, Am. J. Phys. **67** (1999), str. 354–356.
- [4] I. Verovnik, A. Likar in J. Strnad, *Interferenz zweier Laser: ein neuartiges Schulexperiment*, Prax. Nat. wiss. Phys. **41** (1992), str. 20–24.
- [5] L. Basano, R. Chittifrati, S. Crivello, E. Piano in C. Pontiggia, *Simple setup for detecting interference fringes produced by independent lasers*, Am. J. Phys. **65** (1997), str. 996–1000.
- [6] F. Louradour, F. Reynaud, B. Colombeau in C. Froehly, *Interference fringes between two separate lasers*, Am. J. Phys. **61** (1993), str. 242–245.
- [7] I. Verovnik in A. Likar, *The Michelson interferometer – how to detect invisible interference patterns*, Eur. J. Phys. **25** (2004), str. 801–806.