

# Nastavni pristup interferenciji svjetlosti

---

**Brlenić, Maja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:561915>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Maja Brlenić

**NASTAVNI PRISTUP INTERFERENCIJI**  
**SVJETLOSTI**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Maja Brlenić

**NASTAVNI PRISTUP INTERFERENCIJI**  
**SVJETLOSTI**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
doc. dr. sc. Maja Planinić

Zagreb, 2022.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

*Ovaj diplomski rad posvećujem svojim roditeljima Dušanki i Zvonimiru, svojim sestrama Eni i Hanni te baki Anki, koji su tijekom mog studiranja uvijek bili uz mene, pružili mi bezuvjetnu potporu, razumijevanje, pomoć i neizmjernu ljubav. Riječima ne mogu pokazati koliko sam im zahvalna na svemu.*

*Hvala mom dečku, Karlu, koji mi je bio oslonac i snaga kroz lijepe, ali i kroz one manje lijepe trenutke. Zahvaljujem svim prijateljima, posebno Ani, Jeleni, Evi i Ivani zbog kojih će mi studentske godine ostati u lijepom sjećanju.*

*I na kraju, veliko hvala i svim profesorima koji su me vodili ovim putem, a posebna zahvala mentorici doc. dr. sc. Maji Planinić na svim savjetima, uloženom vremenu i pruženoj pomoći tijekom pisanja ovog rada.*

*Hvala svima što ste vjerovali u mene!*

# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iv</b>
<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Interferencija valova</b>	<b>2</b>
1.1 Interferencija svjetlosti . . . . .	5
Uvjeti interferencije . . . . .	5
Interferencijski uzorci . . . . .	9
Youngov pokus . . . . .	10
Optička rešetka . . . . .	12
<b>2 Učeničke poteškoće u valnoj optici</b>	<b>13</b>
2.1 Istraživanja u svijetu . . . . .	13
Studentske poteškoće vezane uz interferenciju svjetlosti . . . . .	14
Primjer poteškoća . . . . .	16
Rezultati istraživanja na južnoafričkim studentima . . . . .	18
2.2 Istraživanja u Hrvatskoj . . . . .	21
Demonstracijski intervjui . . . . .	21
Interferencija svjetlosti na dvostrukoj pukotini . . . . .	22
Razvoj i primjena konceptualnog testa iz valne optike . . . . .	24
<b>3 Nastavni pristup interferenciji svjetlosti</b>	<b>37</b>
3.1 Interferencija svjetlosti u kurikulumu Fizike . . . . .	37
3.2 Interferencija svjetlosti u standardnoj nastavnoj praksi . . . . .	39
3.3 Interferencija svjetlosti u istraživački usmjerenoj nastavi fizike . . . . .	41
<b>4 Nastavna sekvenca: Interferencija svjetlosti</b>	<b>44</b>
<b>5 Zaključak</b>	<b>66</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>67</b>

# Uvod

Svjetlost je jedna od prvih pojava koja je bila predmet proučavanja brojnih znanstvenika, koji su pokušavali shvatiti i razumjeti zašto se svjetlost u različitim situacijama ponaša drugačije. U nekim situacijama svjetlost se može objasniti valnim, a u nekim valno-čestičnim modelom. U ovom radu koncentrirat ću se na valni model svjetlosti.

Interferencija svjetlosti je tema koja je u srednjoškolskoj nastavi fizike sadržana u cjelini „Valna optika“, a za navedenu pojavu predviđena su dva do tri nastavna sata, ovisno o programu škole. No, upravo valna svojstva svjetlosti učenicima stvaraju poteškoće u razumijevanju optike. Opis svjetlosti kao vala učenicima nije blizak, zbog čega često dolazi do pogrešnog tumačenja polarizacije, ogiba te interferencije svjetlosti.

Kako bi se opisale valne pojave vezane uz svjetlost, potrebno je znanje elektromagnetizma, titranja, ali i geometrijske optike, zbog čega rad započinjem definiranjem i opisivanjem pojave interferencije na mehaničkim valovima. Nakon kratkog predočavanja interferencije na mehaničkim valovima prelazim na opisivanje interferencije svjetlosti i popratnih pokusa i pojava. Zatim navodim ključne učeničke poteškoće vezane uz interferenciju svjetlosti uz opis i glavne rezultate nedavno provedenog istraživanja na tu temu, u okviru HRZZ projekta IP-2018-01-9085 koji provodi Grupa za metodiku nastave fizike s Fizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu. [7] U sljedećem poglavlju se osvrćem na standardni nastavni pristup interferenciji svjetlosti s pregledom literature i udžbenika koji su trenutno u uporabi u Hrvatskoj. Rad završavam poglavljem u kojem je predstavljena istraživački usmjerena nastavna sekvenca čiji je cilj obrada interferencije svjetlosti u srednjim školama s dva sata fizike tjedno sa svrhom razvijanja boljeg razumijevanja te pojave kod učenika. Cilj je i potaknuti učenike na proces aktivnog učenja i istraživanja kako bi nastava fizike bila što više istraživački oblikovana, kako je propisano Nacionalnim kurikulumom fizike. [2]

Pojava interferencije prije svega je važna za razumijevanje valne optike, a također i za razumijevanje principa djelovanja niza instrumenata kao što su interferometri i interferencijski mikroskopi. Najpoznatiji od svih je interferometar, mjerni uređaj kojim se pomoću interferencijskih pruga mogu provoditi precizna mjerenja. Osim fizike i astronomije koristan je u inženjerstvu i primijenjenoj znanosti, ali i biologiji i medicini. Moguća su precizna mjerenja velikih udaljenosti, valnih duljina, rotacija, indeksa loma i brojna druga.

# Poglavlje 1

## Interferencija valova

Interferenciju opisujemo kao međudjelovanje valova koji istodobno prolaze kroz neki prostor, pa ćemo ju najprije analizirati na mehaničkim valovima, na vodi. To je pojava superpozicije, zbrajanja valova koji se sretnu u nekoj točki prostora stvarajući rezultatni val. Načelo superpozicije valova predstavlja ukupni pomak čestice sredstva u prostoru kao zbroj doprinosa svakog pojedinog vala koji interferiraju. Da bismo dobili stalan interferencijski uzorak u prostoru izvori valova moraju biti koherentni, što znači da valovi moraju imati jednaku valnu duljinu, tj. jednaki razmak između valnih fronti, te stalnu razliku u fazi,  $\varphi$ , a time i razliku hoda,  $\delta$ . [9, 11]

Razlikom hoda zovemo razliku putova koju dva vala prođu od izvora do određene točke prostora,

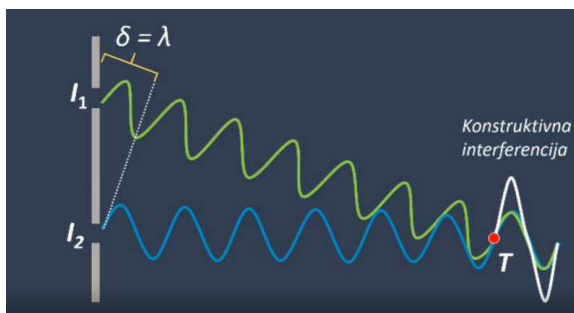
$$\delta = r_1 - r_2. \quad (1.1)$$

Razlika u fazi valova je s razlikom putova povezana na način:

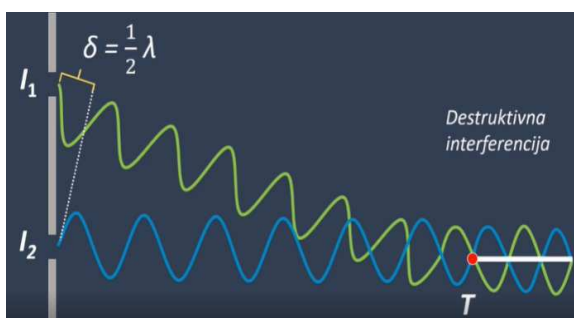
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta. \quad (1.2)$$

Razlika putova valova određuje hoće li doći do konstruktivne ili destruktivne interferencije u nekoj točki sredstva. Rezultatni val može biti veći ili manji u odnosu na valove koji interferiraju. Kada dva ili više valova interferiraju rezultat može biti konstruktivna ili destruktivna interferencija, ovisno o razlici putova, što je vidljivo na slikama 1.1 i 1.2. [12]





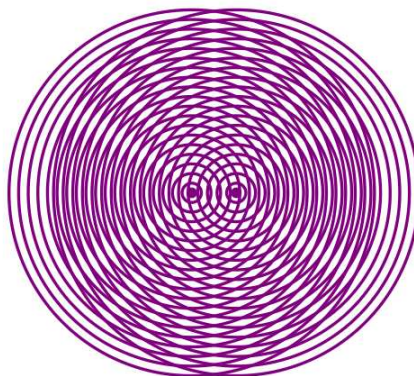
Slika 1.1: Razlika putova kod konstruktivne interferencije [12]



Slika 1.2: Razlika putova kod destruktivne interferencije [12]

Ako je razlika putova jednaka cijelom broju valnih duljina, koherentni valovi koji izlaze u fazi iz izvora  $I_1$  i  $I_2$  dolaze u točku T također u fazi i ondje dolazi do konstruktivne interferencije. Pojednostavljeno rečeno, poklapaju se brijeg i brijeg ili dol i dol ta dva vala, kao i bilo koje druge dvije točke jednakih faza tih valova. Amplituda vala koji nastane na taj način se povećava, tako da se amplitude valova koji interferiraju zbroje, a pritom valovi koji interferiraju ne moraju imati jednake amplitude.

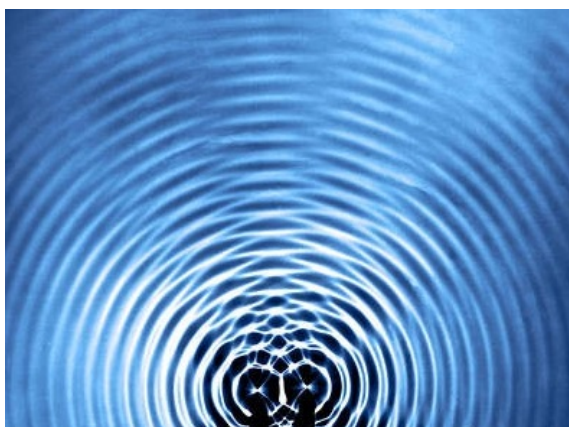
Ako je razlika putova jednaka neparnom broju polovina valne duljine, valovi su u protufazi u točki T i ondje dolazi do destruktivne interferencije, tj. poklapaju se brijeg jednog i dol drugog vala, kao i bilo koje druge dvije točke suprotnih faza tih valova. To znači da se destruktivnom interferencijom amplituda resultantnog vala smanji ili čak potpuno poništi, ako su valovi bili jednakih amplituda. [10]



Slika 1.3: Interferencija valova prikazana koncentričnim valnim frontama[12]

Koncentrične kružnice na slici 1.3 predstavljaju vrhove brjegova valova. Pri susretu brjegova i brjegova ili dolova i dolova dva vala dolazi do pojačavanja, a pri susretu brjegova i dolova dva vala dolazi do slabljenja.

Kada bismo promatrali interferiranje kružnih mehaničkih valova na vodi mogli bismo uočiti područja pojačanja i poništenja valova, prikazana na slici 1.4.

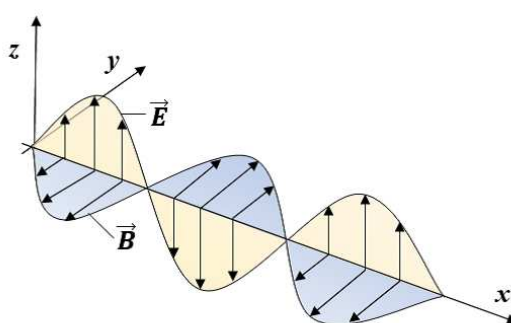


Slika 1.4: Interferencija valova na vodi [16]

## 1.1 Interferencija svjetlosti

Najlakše je uočiti pojavu interferencije promatrajući valove na vodi, koji nastaju iz dva bliska izvora, dok je to nešto teže kod svjetlosti.

Svjetlost je u svojoj suštini elektromagnetski val, no svi elektromagnetski valovi nisu ujedno svjetlost, samo vidljivi dio elektromagnetskog zračenja nazivamo svjetlost. Elektromagnetske valove čine povezana električna i magnetska polja. Električno i magnetsko polje vala međusobno su okomiti i titraju u vremenu, a oba su okomita na smjer širenja vala, što znači da su elektromagnetski valovi transverzalni. [10]



Slika 1.5: Prikaz elektromagnetskog vala koji se širi u +x smjeru

Kako je interferencija uobičajena valna pojava koja je karakteristična za svako valno gibanje, moguće je tu pojavu uočiti i na svjetlosti. Pojava interferencije zapravo je jedan od argumenata u prilog valnom modelu svjetlosti.

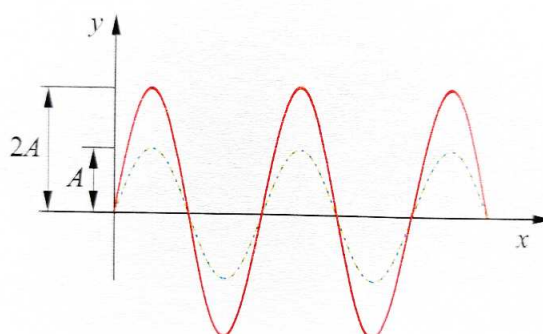
### Uvjeti interferencije

Da bi došlo do pojave stalnog interferencijskog uzorka valovi moraju biti koherentni. To znači da valovi moraju imati identične valne duljine i amplitude te razliku faza koja se ne mijenja u vremenu.

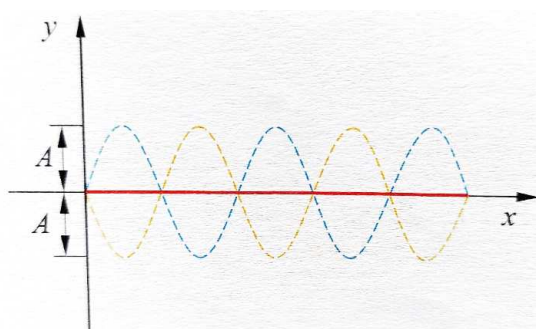
Ako bismo između izvora svjetlosti i zaslona stavili zaslon s dvije uske paralelne pukotine dobili bismo dva koherentna izvora svjetlosti. Izvori svjetlosti bi zapravo bile postavljene pukotine. [11]

Kada dolazi do interferencije svjetlosti dvaju ili više svjetlosnih valova, ukupna amplituda je rezultat algebarske sume amplituda svakog vala pojedinačno.

Ako je amplituda rezultantnog vala veća od amplitude valova pojedinačno, oni interferiraju konstruktivno, slika 1.6. Ako se amplituda rezultantnog vala smanjila ili su se valovi potpuno poništili, interferirali su destruktivno, slika 1.7. [9]



Slika 1.6: Amplituda dvaju valova koji konstruktivno interferiraju [9]



Slika 1.7: Amplituda dvaju valova koji destruktivno interferiraju [9]

Osim o amplitudi, rezultatni val ovisi i o razlici putova između dva vala. Valovi na putu od izvora do točke u kojoj se susreću prelaze određenu udaljenost. Razliku putova koje valovi prelaze do susreta zovemo i razlikom hoda,  $\delta$ , nadalje u radu ćemo se koristiti samo terminom razlika putova, a računamo ju na način:

$$\delta = |r_1 - r_2|, \quad (1.3)$$

gdje  $r_1$  i  $r_2$  predstavljaju put koji svjetlost prijeđe od izvora do neke točke prostora. Zbog razlike putova do točke susreta valovi se mogu, a i ne moraju razlikovati u fazi.

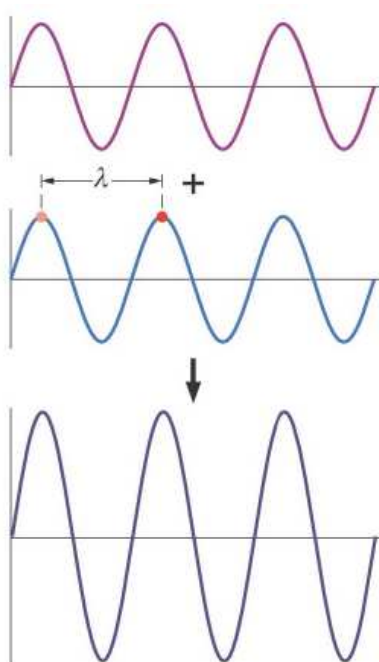
**Konstruktivna interferencija**

Valovi u točku susreta mogu doći s istom fazom, i tada će se međusobno „pojačati“, a interferencija će biti konstruktivna.

Razlika putova valova, koji su u točki susreta interferirali konstruktivno, jednaka je cjelobrojnom višekratniku valnih duljina:

$$\delta = k\lambda, \quad (1.4)$$

pri čemu je  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ .[10]



Slika 1.8: Razlika putova jednaka nuli, konstruktivna interferencija valova [9]

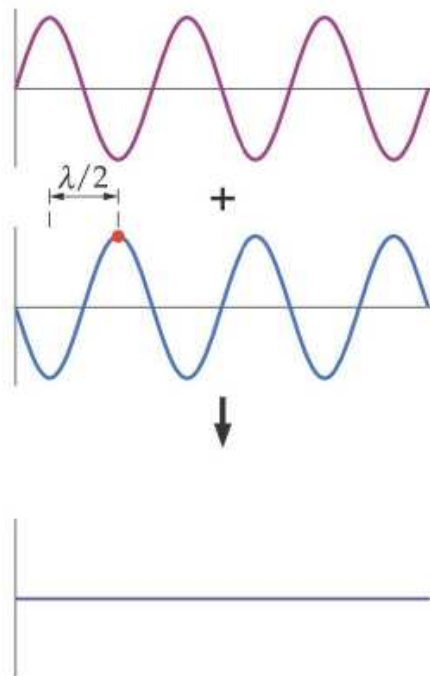
**Destruktivna interferencija**

Druga je mogućnost da valovi u točku susreta dođu sa suprotnim fazama: valovi su tada u protufazi, međusobno će se poništiti, a nastala interferencija bit će destruktivna.

Razlika valova koji u točki susreta interferiraju destruktivno jednaka je neparnom broju polovina valne duljine:

$$\delta = (2k - 1)\frac{\lambda}{2} \quad (1.5)$$

pri čemu je  $k = 1, 2, 3, \dots$  [10]



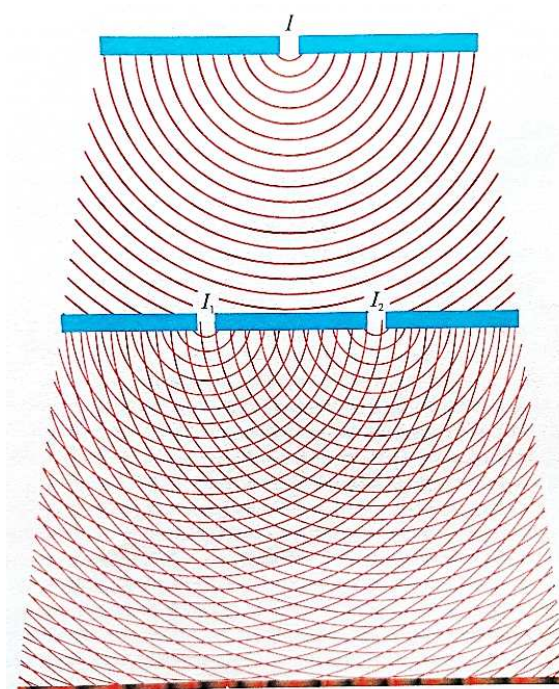
Slika 1.9: Razlika putova jednaka polovini valne duljine, destruktivna interferencija [9]

## Interferencijski uzorci

Svijetle pruge kod svjetlosti predstavljaju konstruktivnu interferenciju i to su mjesta interferencijskih maksimuma, dok tamne pruge predstavljaju destruktivnu interferenciju, tj. to su mjesta interferencijskih minimuma.

Pruge interferencije su ekvidistantne, odnosno jednako razmaknute, te za razmak  $s$  između dviju svijetlih ili dviju tamnih pruga vrijedi:

$$s = \frac{\lambda a}{d}. \quad (1.6)$$



Slika 1.10: Interferencija svjetlosti - dvije pukotine služe kao dva točkasta izvora [9]

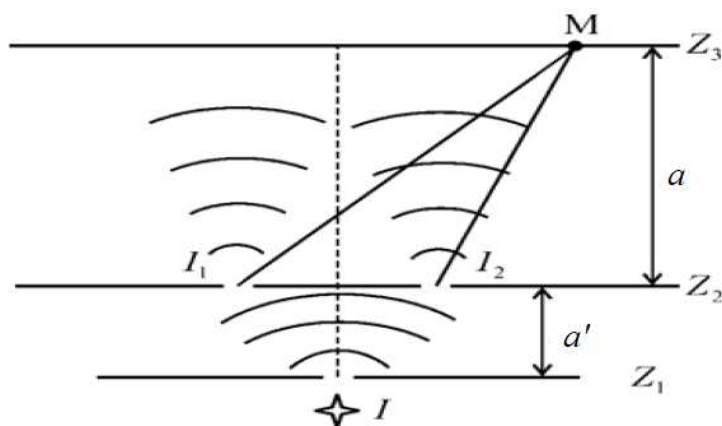
Na prethodnoj je slici 1.10 vidljiv interferencijski uzorak na zaslonu dobiven interferencijom svjetlosti iz dva točkasta izvora. [10]

## Youngov pokus

Thomas Young (1773. - 1829.) bio je engleski znanstvenik, koji je imao široko područje istraživanja. Između ostalog postavio je temelje valne teorije svjetlosti, proučavao i razjasnio interferenciju svjetlosti i formirao hipotezu o svjetlosti kao transverzalom valu. [15]

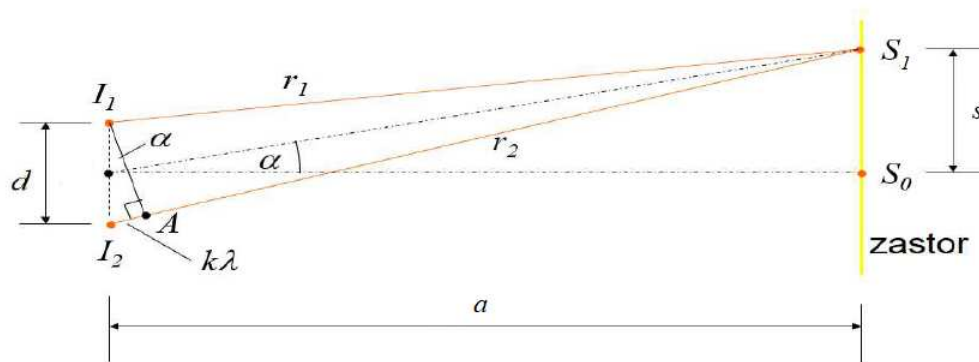
Pokus s dvije pukotine koji je 1801. godine napravio Thomas Young, bio je jedan od prvih pokusa kojima je potvrđeno da je svjetlost val. Taj se pokus i danas uglavnom koristi kako bi se demonstrirala pojava interferencije svjetlosti. [11]

Young je koristio dvije uske pukotine kako bi od jednog snopa dobio dva koherentna vala. Kroz ulaznu pukotinu je propuštao Sunčevu svjetlost, da dobije uzak snop svjetlosti, a na nekoj udaljenosti iza nje postavio je zaslon s dvije pukotine kako bi dobio dva koherentna izvora svjetlosti. (Danas se Youngov pokus obično demonstrira pomoću laserske svjetlosti, pa prva pukotina nije potrebna.) Iza tih dviju pukotina postavio je još jedan zaslon, na kojem je opazao interferencijsku sliku, koja je dobivena ispreplitanjem dvaju snopova svjetlosti. Da bi se opazila interferencijska slika važno je da razmak između dvaju izvora, odnosno dviju pukotina na istome zaslonu, bude veoma malen, veličine okvirno do 1000 valnih duljina svjetlosti. Karakterističan eksperimentalni razmak između pukotina je 0.1 mm.



Slika 1.11: Shematski prikaz Youngovog pokusa





Slika 1.12: Geometrija Youngovog pokusa

Na slikama 1.11 i 1.12 vidljivi su shematski prikaz Youngovog pokusa i geometrija Youngovog pokusa. Opišimo put snopova svjetlosti.

Izvor svjetlosti najprije osvjetljava prvi zaslon s jednom uskom pukotinom, iz koje zatim izlazi kružni svjetlosni val, jer pukotina predstavlja točkasti izvor svjetlosti. Svjetlosni val tada upada na drugi zaslon s dvije uske i bliske pukotine,  $I_1$  i  $I_2$ . Iz dviju pukotina, koje se na zaslonu nalaze na međusobnoj udaljenosti  $d$ , izlaze dva koherentna vala, tj. pri izlazu iz dviju pukotina valovi su u fazi. Udaljenost prepreke s dvije pukotine od zaslona s uzorkom označena je s  $a$ , dok je udaljenost od nultog do prvog maksimuma, kao i razmak bilo koja druga dva susjedna maksimuma, označena slovom  $s$ .

U točki  $S_0$  valovi se zbrajaju i daju interferencijski maksimum. No, do točke  $S_1$ , svjetlosni val iz izvora  $I_2$  prevali dulji put od vala iz izvora  $I_1$ , zbog čega razlika putova više nije nula. Ovisno o tome je li razlika putova jednaka cijelom broju valnih duljina ili neparnom broju polovina valne duljine doći će do konstruktivne interferencije (svijetle pruge), odnosno destruktivne interferencije (tamne pruge).

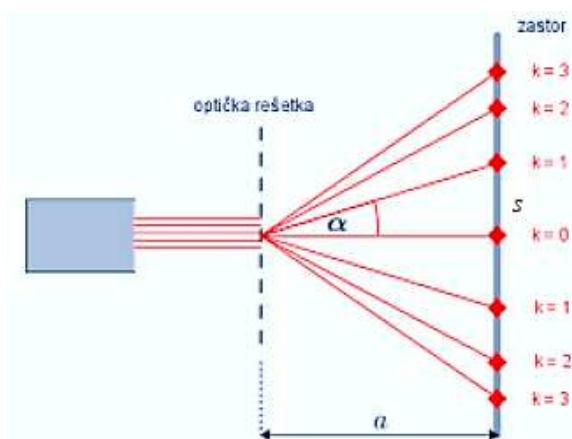
Uzorak koji je vidljiv na posljednjem zaslonu sastoji se od niza svijetlih i tamnih paralelnih pruga. Kako je u svojem pokusu Young koristio bijelu (Sunčevu) svjetlost, interferencijske pruge dobivene na zastoru bile su obojene, tj. interferencijski maksimumi pokazivali su spektar boja. Središnja pruga, odnosno središnji maksimum, tada je bijele boje.

Ukoliko se pokus izvodi koristeći monokromatsku svjetlost, maksimumi su u boji monokromatske svjetlosti izvora, dok su minimumi tamne pruge.

## Optička rešetka

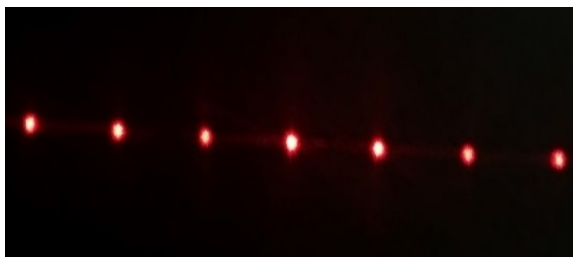
Optička rešetka je uređaj s mnogo razmaknutih, ekvidistantnih i paralelnih pukotina (zareza). Young je svoj pokus izveo na dvije pukotine, dok se u slučaju optičke rešetke radi o velikom broju pukotina, pri čemu svaka postaje novi izvor koji emitira valove. U svakoj točki prostora dolazi do superpozicije, odnosno interferencije valova svjetlosti iz svih izvora.

Konstantom optičke rešetke,  $d$ , nazivamo razmak između susjednih pukotina, a određuje se izrazom:  $d = \frac{b}{N}$ , pri čemu  $b$  označavamo širinu optičke rešetke, a  $N$  broj pukotina na rešetki. Na zaslonu će se pojaviti svijetla pruga (maksimum), tj. doći će do konstruktivne interferencije, ondje gdje je zadovoljen uvjet:  $k\lambda = d \sin \alpha$ , pri čemu je  $\alpha$  kut koji svjetlosni snopovi zatvaraju s okomicom na optičku rešetku, dok je  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ , redni broj maksimuma. [10]



Slika 1.13: Interferencija na optičkoj rešetki

U Youngovom pokusu interferiraju samo dva vala, dok u slučaju optičke rešetke interferira veći broj valova, zbog čega dobivamo svijetle pruge jačeg intenziteta i šireg međusobnog razmaka.



Slika 1.14: Uzorak dobiven interferencijom crvene svjetlosti na optičkoj rešetki [7]

## Poglavlje 2

# Učeničke poteškoće u valnoj optici

### 2.1 Istraživanja u svijetu

Da bi se prepoznale specifične studentske i učeničke poteškoće vezane uz valnu optiku provedeno je više istraživanja u svijetu, od kojih će neka biti ovdje predstavljena. Istraživačke metode su obuhvaćale intervjuje uz demonstracijske pokuse i testiranje. Pitanja koja su bila upotrijebljena za istraživanje su razvijana, modificirana i testirana u dužem vremenskom periodu. Analiziranjem odgovora pokušalo se razumjeti na koji način učenici i studenti razmišljaju i koje poteškoće pri tome susreću. U ovome su radu opisane samo poteškoće koje su široko rasprostranjene i česte. Većina rezultata istraživanja navedenih u radu dobivena je na University of Washington (dio podataka došao je i s University of Maryland) u SAD-u, gdje je provedeno istraživanje na 410 studenata koji slušaju uvodne kolegije iz fizike, pri čemu je istraživanje sadržavalo predtestiranje, prije nego su studenti obradili ispitivano gradivo i testiranje nakon što su obradili gradivo. Testiranja su obuhvaćala tekstualna pitanja i demonstracijske intervjuje. [3, 5]

Na University of Technology u Republici Južne Afrike istraživanje je provedeno na 133 studenta prve godine studija, a provedeno je u obliku ispunjavanja upitnika. [4]

Bit će spomenuta i istraživanja u Hrvatskoj, provedena u sklopu HRZZ projekta IP-2018-01-9085 na Fizičkom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu, provedena pomoću intervjuja uz demonstracijske pokuse i pomoću konceptualnog testa. [6, 7]

Tijekom prve godine učenja fizike, američki studenti [3] bili su upoznati s dva modela svjetlosti. Od ranije su bili upoznati s geometrijskom optikom: idejom o pravocrtnom širenju svjetlosti, koju su proširili učenjem refleksije i loma, crtanjem dijagrama zraka svjetlosti i rješavanjem numeričkih zadataka koji uključuju jednostavne optičke sustave. Nakon toga, u valnoj optici studenti su spoznali da je svjetlost elektromagnetski val. Učili su koncepte i pojave valne optike, kako bi predvidjeli i objasnili interferenciju i ogib te eksperimentalni uzorak dobiven pomoću monokromatske ili bijele svjetlosti na jednoj pu-

kotini, dvije pukotine ili optičkoj rešetci.

Poteškoće studenata razvrstane su u sedam skupina od kojih su neke povezane. Greške koje su uočene zapravo su posljedice nedostatka konceptualnog okvira i nedostatnog razumijevanja valne optike kod studenata. Izdvojiti ćemo za potrebe ovog rada samo poteškoće vezane uz interferenciju svjetlosti.

## Studentske poteškoće vezane uz interferenciju svjetlosti

### a. Nerazlikovanje geometrijske i valne optike

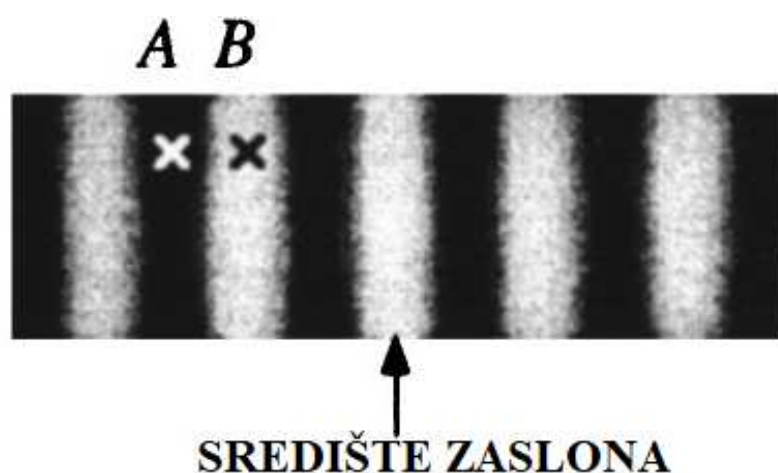
Mnogi studenti su tijekom intervjua pogriješili u razmatranju treba li za određenu situaciju primijeniti geometrijsku ili valnu optiku. Pokušavali su primijeniti jedan model dok je prikladan bio drugi ili kombinirati ideje oba modela stvarajući „hibridni“ model.

Do pogreške je dolazilo već u prepoznavanju razlike između superpozicije u geometrijskoj i valnoj optici. Mnogi studenti nisu shvatili da se superpozicija svjetlosti promatra različito u dvije situacije. [3, 5]

### b. Neprepoznavanje uzorka dobivenog interferencijom svjetlosti kroz dvije pukotine

Osnovna ideja za interpretiranje uzorka kojeg proizvode dvije uske pukotine je prepoznati da je svaka pukotina izvor valova koji zatim međusobno interferiraju.

Studentima je dana fotografija, Slika 2.1, s interferencijskim uzorkom dobivenim pomoću svjetlosti na dvostrukoj pukotini. Na fotografiji je vidljiv samo središnji dio pa su svi maksimumi približno jednakog intenziteta. Zatim je studentima rečeno da pretpostave na koji će se način promijeniti uzorak ako se lijeva pukotina prekrije. [3, 5]



Slika 2.1: Uzorak dobiven interferencijom svjetlosti na dvostrukoj pukotini [5]

Da bi dali točan odgovor studenti su morali prepoznati da svaka pukotina djeluje kao točkasti izvor, te da minimume, odnosno tamne pruge, uzrokuje destruktivna interferencija svjetlosti iz dvaju izvora. Samo je 40% studenata dalo točan odgovor da će nakon prekrivanja jedne pukotine zaslon biti gotovo uniformno osvijetljen, jer je interferencijski uzorak posljedica interferencije svjetlosti valova iz oba izvora (pukotine) [3, 5]

Drugi studenti su pri odgovoru napravili sljedeće greške:

1. Prva kriva pretpostavka bila je da svaka pukotina, sama, proizvodi jednak uzorak, ali slabijeg intenziteta, dok će dvije pukotine proizvesti takav jednak, ali svjetliji uzorak. Većina tih studenata iznijela je svoju pretpostavku da će se prekrivanjem jedne pukotine samo smanjiti intenzitet linija uzoraka, te su bili mišljenja da svaka pukotina zasebno proizvodi isti uzorak kao i dvije pukotine. Kako bi dobili uzorak dvije pukotine, zbrajali su intenzitete svake pukotine zasebno, bez obzira na razliku u fazi, tj. razliku putova do koje dolazi kad osvijetlimo dvije pukotine. Takvom superpozicijom zapravo su primjenjivali geometrijsku optiku na pojavu interferencije. Čak je 25% studenata mislilo da će sve linije uzorka ostati ukoliko se jedna pukotina prekrije. [5]
2. Druga kriva pretpostavka bila je da svaka pukotina zasebno proizvodi polovinu uzorka dobivenog s obje pukotine. 20% studenata je interferencijski uzorak na dvije pukotine opisao kao zbroj uzoraka svake pukotine zasebno, na način da je svaka pukotina zasebno zaslužna za polovinu interferencijskog uzorka. [5] Dio ispitanih studenata je tvrdio da lijeva pukotina proizvodi svijetle linije s lijeva, te da bi one nestale ukoliko se lijeva pukotina prekrije. Ta tvrdnja bi bila točna da se interferencija pojavljuje u okviru geometrijske optike gdje je određeno svijetlo područje moguće povezati s određenom pukotinom.

**c. Poteškoće s povezivanjem interferencije s razlikom putova (odnosno razlikom u fazi)**

Mnogi studenti ne prepoznaju važnu ulogu razlike putova (odnosno razlike u fazi) u određivanju efekata interferencije. Poteškoća je vidljiva i na valovima na vodi. Tijekom intervjua i pisanih odgovora na pitanja primijećeno je neprepoznavanje važne uloge razlike putova (razlike u fazi) u određivanju položaja maksimuma i minimuma.

Studenti razvijaju pojednostavljen model koji im onemogućuje interpretaciju linija minimuma i linija maksimuma konstruktivne interferencije dvaju točkastih izvora sa stalnom razlikom u fazi.

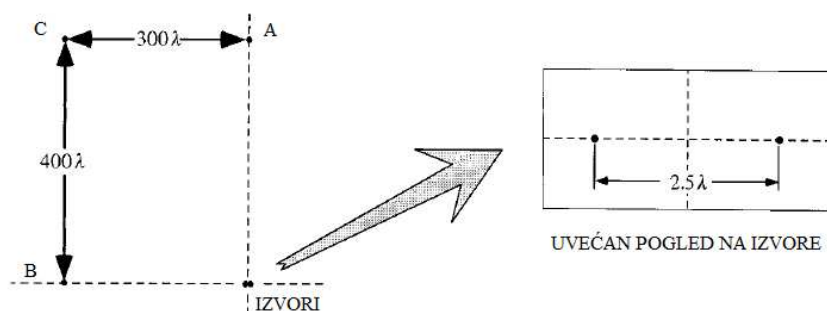
#### d. Nedostatak kvalitativnog, konceptualnog razumijevanja valnog modela svjetlosti

Studenti koji su uspjeli prepoznati da je u određenoj situaciji potreban valni model, nisu uspjeli razumjeti kako ga primijeniti u odnosu na ogib ili interferenciju. Najveći problem i česta uobičajena poteškoća kod studenata bila je nemogućnost objašnjavanja pojave interferencije. Prvi problem koji se pojavljuje je prepoznati da uska pukotina djeluje kao točkasti izvor. Zato je potrebno analogijom utvrditi da se valovi na vodi i svjetlosni valovi ponašaju na isti način.

Osim već navedenih poteškoća, nekolicina studenata ima problema s prikazom svjetlosti pomoću valnih fronti i izražavanjem udaljenosti u valnim duljinama svjetlosti.

#### Primjer poteškoća

Sljedeći primjer detaljnije prikazuje poteškoće u povezivanju interferencije s razlikom putova i nedostatak kvalitativnog, konceptualnog razumijevanja valnog modela svjetlosti. Pitanje koje je postavljeno [3], bilo je povezano s uzorkom interferencije koji proizvode dva mala vibrirajuća objekta u velikom spremniku vode.



Slika 2.2: Određivanje konstruktivne i destruktivne interferencije u točkama A, B i C [3]

Slika 2.2 prikazuje spremnik s vodom s dva izvora kružnih valova razmaknuta za  $2.5\lambda$ . Studentima je bio zadatak odrediti vrstu interferencije u označenim točkama te razliku u fazi u označenim točkama.

Uz to pitanje studentima je prikazana slika spremnika u kojem su dva izvora razmaknuta za  $2.5\lambda$  i označene su tri točke (A, B i C). Za svaku od označenih točaka studenti su trebali odrediti je li u tim točkama došlo do konstruktivne interferencije, potpune destruktivne interferencije ili ništa od navedenog. U svakoj su točki trebali odrediti razliku u fazi dvaju valova, pri čemu su trebali primijetiti da razlika u fazi u nekoj točki ovisi o razlici putova valova od izvora.

Trebali su prepoznati da je u točki A razlika putova jednaka nuli, a valovi su u fazi. U točki B razlika putova jednaka je razmaku između dvaju izvora što je  $2.5\lambda$ , a razlika u fazi između ta dva vala je  $\pi$ , tj. valovi nisu u fazi. Iz poznatih brojčanih vrijednosti tada se zna da u točki A dolazi do maksimuma konstruktivne interferencije, a u točki B do potpune destruktivne interferencije. Za točku C studenti su mogli izračunati duljinu puta koju val prijeđe za svaki izvor zasebno, koristeći Pitagorin poučak, i tada izračunati razliku putova. Kako razlika putova ispada neparan broj polovina valnih duljina ( $1.5\lambda$ ), tada u točki C dolazi do destruktivne interferencije, a valovi nisu u fazi, tj. razlika u fazi iznosi  $\pi$ . Ovaj zadatak dan je 1 200 američkih studenata, nakon što su studenti učili gradivo o interferenciji. Za točke A i B oko 35% studenata dalo je točan odgovor. Samo je 10% studenata, zbog čega je to i najčešća greška, pokušalo pronaći razliku putova za točku C. [3]

Dio studenata obrazložio je da je točka B od izvora udaljena  $300\lambda$ , što je cijeli broj valnih duljina pa će u toj točki doći do konstruktivne interferencije. Dio studenata svoje je obrazlaganje temeljilo na smjeru širenja valova od izvora. Neki su tvrdili da u točki B, valovi se iz oba izvora šire u istome smjeru zbog čega će doći do konstruktivne interferencije, dok će u točkama A i C doći do djelomične destruktivne interferencije, jer se valovi ne šire u potpuno istom smjeru. Pri svojim obrazloženjima nisu u obzir uzeli i nisu prepoznali da superpozicija valova ovisi o razlici u fazi i amplitudi, a ne o smjeru širenja valova.

Greška koja je bila česta kod studenata je ta da su interferenciju valova u točki određivali ukupnom duljinom putova ili smjerom širenja od svakog izvora. Greška je u tome što su pri određivanju konstruktivne odnosno destruktivne interferencije dvaju izvora koristili ukupnu duljinu puta, umjesto razlike putova.

Još jedno pogrešno mišljenje kod studenata je da s povećavanjem udaljenosti razlika putova postaje zanemariva. Jedan od studenata u istraživanju izjavio je da će u točki C interferencija biti konstruktivna, jer je udaljenost od izvora do točke C puno veća od udaljenosti između samih izvora. Drugi student je uz istu izjavu obrazložio da je udaljenost između izvora,  $2.5\lambda$ , mala u odnosu na  $400\lambda$  i  $300\lambda$ , pa će dva izvora djelovati kao jedan.

Mnogi studenti ne razumiju kako ponašanje vode u spremniku u proizvoljnim točkama može rezultirati superpozicijom valova iz dva izvora. Kako bi se studentima pomoglo u primjeni superpozicije i prepoznavanju važne uloge razlike putova (ili razlike u fazi) dane su im dvije slike koncentričnih kružnica, koje su predstavljale valne fronte dvaju točkastih izvora. Jedna od slika bila je na papiru, dok je druga „identična“ bila na prozirnoj foliji.

Vođeni pitanjima na radnim listićima [5], preklapanjem dviju slika mogli su zaključiti na kojoj se međusobnoj udaljenosti nalaze izvori, u kojim točkama dolazi do konstruktivne ili destruktivne interferencije. Istraživanje su započeli smještanjem izvora u istu točku, a zatim pomičući jedan izvor dolaze do opažanja da se linije neće presijecati ako je udaljenost izvora manja od  $\frac{\lambda}{2}$ .

Otkrili su da u nekim točkama površina miruje, dok u drugima titra maksimalnom amplitudom. Pomoću toga su prepoznali da do konstruktivne interferencije dolazi kad je

razlika putova valova od izvora do promatrane točke jednaka cijelom broju valnih duljina. Osim toga zaključili su da za bilo koju međusobnu udaljenost izvora vrijednost razlike putova može najviše iznositi udaljenost izvora,  $d$ .

#### **e. Poteškoće u povezivanju interferencijskog uzorka s karakteristikama optičkog sustava**

Promjene u optičkom sustavu uključuju pitanja koja istražuju hoće li studenti razumjeti kako će promjena jedne karakteristike optičkog sustava utjecati na opaženi interferencijski uzorak [5]. Studentima su pokazana dva slična uzorka, jedina razlika u drugom interferencijskom uzorku bila je da su pruge maksimuma (odnosno minimuma) međusobno bile udaljenije. Postavljeno im je pitanje kako bi se drugi uzorak mogao dobiti iz prvog ako na sustavu promijenimo jedno svojstvo (promjena udaljenosti među pukotinama, promjena valne duljine svjetlosti ili promjena udaljenosti zaslona s pukotinama od zaslona na kojem je projiciran uzorak). Neki studenti prisjetili su se interferencije na dvije pukotine na vodi, te su došli do zaključka da će se smanjivanjem udaljenosti između izvora povećati udaljenost između pruga maksimuma (odnosno minimuma), što je i točan odgovor. Samo je 25% studenata prepoznalo da se razmak među pukotinama mora smanjiti, dok je 45% tvrdilo da se razmak među pukotinama treba povećati. [5]

#### **f. Poteškoće s konceptima moderne fizike**

U modernoj fizici uvodi se kvantni model svjetlosti kao roja fotona. Studenti koji su čuli za taj model imali su dodatne poteškoće miješanja tog modela s valnim te iskazivali ideje da se fotoni gibaju ravnom linijom, a zatim saviju blizu rubova uske pukotine ili da se fotoni gibaju sinusoidalno, te da ih je potrebno dva ili više da bi došlo do pojave ogiba ili interferencije [3]. No, u ovom radu fokus je na valnom modelu svjetlosti, zbog čega nećemo opširnije ulaziti u te poteškoće.

### **Rezultati istraživanja na južnoafričkim studentima**

U južnoafričkom istraživanju na studentima [4] uočene su još neke poteškoće vezane uz interferenciju svjetlosti. Upitnikom i testom ispitana su 133 studenta i ustanovljene su sljedeće poteškoće:

- 1) Ideja da se princip superpozicije primjenjuje i na valne duljine, a ne samo na amplitude valova

Studenti nisu u potpunosti shvatili načelo superpozicije. Bili su mišljenja da se načelo superpozicije primjenjuje na obje osi, gdje se na y-osi zbrajaju amplitude, dok se na x-osi zbrajaju valne duljine. Svoja su razmišljanja argumentirali sljedećim tvrdnjama:



Dva vala su slična pa će kombinacija biti udvostručivanje izvornog vala, tj. bit će dva puta veće amplitude i valne duljine.”

“Kako se pulsevi susretnu, amplituda na Y-osi i valna duljina na X-osi će se povećati.

2) Interferencija je uvijek pojačanje valova

Pogrešno shvaćanje principa superpozicije kod učenika i studenata dovodi do toga da interferenciju povezuju samo s konstruktivnom interferencijom, a isključuju mogućnost destruktivne interferencije. Drugim riječima, međudjelovanje dva vala (ili više njih) će za spomenute studente uvijek rezultirati valom jednake ili veće amplitude, a ne smanjenjem amplitude ili potpunim „zamiranjem“ vala. [4]

Neki studenti potkrijepili su svoje tvrdnje primjerima iz života, sa sljedećim tvrdnjama:

(a) „Ako na postojeći val naiđe novi val, nastat će val veće amplitude.“

(b) „Ako do automobila, u kojem glasno svira glazba, parkira drugi automobil s jednako glasnom glazbom, buka će postati još veća.“

(c) „Zbog kombiniranja dva vala, oni neće oslabiti nego ojačati, kao timski rad.“ [4]

3) Interferencija rezultira usrednjavanjem valova (jednaki valovi neće imati učinka jedan na drugoga)

Studenti su bili mišljenja da identični valovi nemaju nikakav efekt jedan na drugog. Kad bi došlo do interferencije dva vala rezultatni val bi bio usrednjene amplitude ili bi val veće amplitude prevladao, što potvrđuje sljedeći citat:

„Kad se susretnu brjegovi dvaju različitih valova, rezultatni val će biti usrednjene vrijednosti oba vala, a točka u kojoj će završiti valovi bit će usrednjena vrijednost x-osi.“

4) Nerazumijevanje pojmova „u fazi“, „izvan faze“, konstruktivna i destruktivna interferencija

Izrazi „u fazi“ i „van faze“ su zbunjujući za neke studente, te su pri pitanjima koja su uključivala „fazu“ učenici postavljali potpitanja kako bi im se pojasnilo što se od njih traži.

Sljedeća tvrdnja ukazuje na njihovu zbunjenost:

„Dva vala koja putuju u istome smjeru, iste amplitude, a nisu u fazi neće ojačati niti umanjiti jedan drugog.“ [4]

Definicije konstruktivne i destruktivne interferencije nisu potpuno jasne. Jedan od uzroka je nejasnoća izraza „u fazi“, „van faze“ što potvrđuju sljedeće tvrdnje učenika:

„Destruktivna interferencija je poništavanje dva vala jednake faze koji se susreću na način da se preklopi brijeg jednog i dol drugog vala.“

„Konstruktivna interferencija je kad se dva vala gibaju u različitim smjerovima.“ [4]

#### 5) Pripisivanje valovima svojstva mase, naboja, proporcionalnosti amplitude i perioda

Jedna od pogrešnih ideja bila je da se valovi sudaraju u skladu sa zakonom očuvanja količine gibanja. Studenti su smatrali da se dva identična vala u fazi, koja dolaze iz suprotnih smjerova, ponište. Stoga, na uzorak interferencije utječu smjer u kojem se puls širi, kao i brzine širenja. U slučaju da se impulsi šire jedan prema drugom, oni se sudaraju i potpuno zaustavljaju ili se nakon sudara kreću unatrag. Iz gledišta sudara valova potječu sljedeće tvrdnje:

„Dva brijega valova će se poništiti i formirati ravnu liniju.“

„Dva pulsa koji se kreću jedan prema drugom će se sudariti i formirati jedan veliki puls. Smjer će ovisiti o pulsu s većom brzinom.“

„Kad se dva vala sretnu u fazi, kretat će se kao dva automobila iste mase i istom brzinom. Pri sudaru, zaustavit će se tamo i tada.“

„Kad se dva pojedinačna brijega valova sretnu, ovisno o brzini kojom se kreću pri sudaru, nastavljaju u suprotnim smjerovima s istom ili većom amplitudom.“

Valovi promatrani kao da imaju pozitivne i negativne naboje, te djeluju odbojnim ili privlačnim silama, druga su pogrešna ideja. Pritom bi identični brijegovi valova djelovali odbojnom silom jedan na drugog i kretali se nakon „sudara“ unatrag. Tvrdnja jednog studenta koja to potvrđuje:

„Identični pulsevi valova će se električki odbijati, zbog čega će se gibati u suprotnim smjerovima.“

Treća pogrešna ideja povezana je s proporcionalnosti amplitude i perioda. Pritom su studenti smatrali da će se smanjivanjem amplitude smanjiti i period. Citat jednog od studenata, koji to potvrđuje:

„Period valova nije isti jer im amplitude nisu iste. Val s amplitudom  $A$  ima upola manji period od vala s amplitudom  $2A$  jer zauzima manji prostor.“ [4]

## 2.2 Istraživanja u Hrvatskoj

### Demonstracijski intervjui

U Hrvatskoj su provedena dva istraživanja s ciljem istraživanja u kolikoj mjeri su nejasnoće i poteškoće u području valne optike identificirane u svijetu i opisane u prethodnom poglavlju, prisutne i kod učenika srednje škole u Hrvatskoj.

Prvo istraživanje provela je Grupa za metodiku nastave fizike s Fizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu putem 27 demonstracijskih intervjua. [6]

Slično istraživanje provedeno je na hrvatskim i austrijskim učenicima. Istraživanjem se željelo otkriti imaju li učenici iz različitih zemalja slične poteškoće. Istraživanje je provedeno kroz demonstracijske intervjue, a izdvojeno je šest najinformativnijih intervjua, 3 hrvatska i 3 austrijska učenika, dok se ostali ne razlikuju značajno od izdvojenih. Cilj ovog istraživanja bio je kvalitativno istražiti i usporediti razumijevanje osnovnih pojava i fenomena valne optike kod hrvatskih i austrijskih srednjoškolaca.

Valna optika u Hrvatskoj nalazi se u nastavnome planu i programu četvrtog razreda srednje škole (kad srednjoškolci imaju 18-19 godina), s predviđenim vremenom obrade od šest do sedam tjedana. U Austriji se ista nastavna cjelina obrađuje u jedanaestom razredu škole (kad učenici imaju 17-18 godina), s predviđenim vremenom obrade od četiri do šest tjedana.

I kod hrvatskih i kod austrijskih srednjoškolaca mogu se uočiti već navedene poteškoće. Kao primjer, neki učenici koriste zakone geometrijske optike za svjetlost koja prolazi uskom pukotinom, dok drugi koriste valni model svjetlosti za prolazak svjetlosti širokom pukotinom.

Učenici ponekad stvaraju i hibridni model, gdje spajaju elemente valne i geometrijske optike da bi objasnili neku pojavu. Valni model svjetlosti učenicima zadaje brojne poteškoće. Neki učenici miješaju valnu duljinu s amplitudom vala, ne razumiju značenje razlike putova i važnost razlike putova za interferenciju. Drugi pak smatraju da se razlika putova može zanemariti ako su udaljenosti u pokusu dovoljno velike.

Poneki učenici promatraju valove kao objekte i očekuju sudare umjesto interferencije, dok drugi misle da je interferencija pojava pojačavanja i amplitude i valne duljine vala. Učenici imaju problema s pokušajima predviđanja i pretpostavki kako bi promjena nekog svojstva, karakteristike postava utjecala na interferencijski uzorak.

Istraživanje je obuhvaćalo demonstracijski pokus, popraćen pitanjima na temu interferencije iz dva izvora te interferencije na optičkoj rešetki. Tijekom intervjua učenicima je prikazan eksperimentalni postav i rečeno im je što će se raditi. Učenici su trebali iznijeti svoja predviđanja i pretpostavke (riječima i skicom) te objašnjenja rezultata nekoliko demonstracijskih pokusa. Prije izvođenja svakog pokusa, od učenika se tražilo predviđanje slike na zastoru, a nakon što je pokus izveden, objašnjenje dobivene slike i opažene pojave. Ukoliko su učenici imali krive pretpostavke ili objašnjenja pojava koje su opažali, nije ih

se ispravljalo tijekom intervjua. Nakon intervjua, ako je učenike zanimalo, mogla je biti održana rasprava o točnim odgovorima. Učenike se poticalo da prilikom odgovaranja na pitanja koriste *think aloud* tehniku, skice i crteže i iznose sva svoja razmišljanja. [6]

Učenik	Zemlja	Spol	Trajanje intervjua	Ocjena iz fizike
Učenik 1C	Hrvatska	Žensko	70 min	Odličan
Učenik 2C	Hrvatska	Muško	67 min	Vrlo dobar
Učenik 3C	Hrvatska	Muško	54 min	Dobar
Učenik 1A	Austrija	Muško	85 min	Odličan
Učenik 2A	Austrija	Muško	57 min	Dobar
Učenik 3A	Austrija	Žensko	76 min	Vrlo Dobar

Tablica 2.1: Popis učenika čija će očekivanja i odgovori biti opisani [6]

## Interferencija svjetlosti na dvostrukoj pukotini

### Očekivanja učenika

Učenicima je pokazan zaslon s dvije uske i paralelne pukotine te im je postavljeno pitanje što će vidjeti na krajnjem zaslonu ako se kroz navedene pukotine propusti crveni snop svjetlosti.

Učenica 1C je očekivala da će na zaslonu uočiti maksimume i minimume, ali je mislila da će biti pozicionirani vertikalno na zaslonu.

Učenik 2C također je očekivao da će vidjeti maksimume i minimume, ali je mislio da će izgledati kao koncentrične kružnice.

Učenik 3C je očekivao da će maksimumi u središtu uzorka biti bliži jedan drugome od maksimuma koji se nalaze na rubovima uzorka.

Austrijski učenici kao očekivanja su naveli sljedeće.

Učenici 1A i 3A očekivali su horizontalno pozicionirane maksimume i minimume, sa smanjivanjem intenziteta maksimuma udaljavanjem od središnjeg maksimuma.

Učenik 2A na zaslonu je očekivao samo jednu točku. [6]

### Analiza i rezultati istraživanja

Nakon što su uočili uzorke na zaslonu učenici su iznijeli svoja objašnjenja i argumente.

Hrvatski učenici su dali sljedeća objašnjenja.

Učenica 1C je rekla da se dvije pukotine ponašaju kao dva izvora svjetlosti i da na neki način međudjeluju stvarajući uzorak na zaslonu. Ista učenica je zatim spomenula i pojavu

interferencije, a objasnila ju kroz preklapanje brjegov a dolova valova.

Učenik 2C je komentirao da se svjetlost na neki način slama prolazeći kroz prepreke između dviju pukotina, ali nije mogao objasniti zašto je uzorak raširen po cijelom zaslonu.

Učenik 3C je kao razlog širenja uzorka po cijelom zaslonu naveo ogib svjetlosti oko prepreke između dvije pukotine, ali je naveo i da su maksimumi, koji su vidljivi na zaslonu, rezultat interferencije svjetlosti.

I austrijski učenici su iznijeli svoja obrazloženja.

Učenik 1A je prokomentirao da svjetlost dolazi sa strane zaslona, gdje nije bila prije, zbog kvantno-mehaničkih efekata. No, kad mu je postavljeno pitanje podrijetla interferencijskog maksimuma pokušao ih je objasniti koristeći valne pojave. Tvrdio je da su maksimumi stvoreni u točkama presjeka svjetlosnih valova.

Učenik 2A je mislio da je uzorak povezan s čestično-valnom, dualnom prirodom svjetlosti, ali nije bio u mogućnosti argumentirati navedeno.

Učenica 3A je rekla da su se minimumi i maksimumi na zaslonu pojavili jer svjetlost kroz jednu pukotinu prijeđe veću udaljenost i jer je jedan od putova strmiji od drugog. [6]

### **Zaključak istraživanja**

Hrvatski učenici su u zadatku interferencije na dvije pukotine promatrali svjetlost kao val. Svi su opisali konstruktivnu i destruktivnu interferenciju svjetlosti koristeći brjegove i dolove valova, a nijedan nije znao kako matematički izraziti uvjete konstruktivne i destruktivne interferencije. Samo jedan od ispitanih hrvatskih učenika je spomenuo razliku putova kao važan uvjet za pojavu interferencije. Većina austrijskih učenika je opisivala svjetlost koristeći hibridni model svjetlosti, ali pri objašnjavanju interferencije svjetlost su smatrali valom. Nijedan od učenika nije pokazao dovoljno razumijevanje uvjeta interferencije. Na primjer, učenica 1C smatra da se rubovi pukotina ponašaju kao izvori svjetlosti, učenica 3A koristi geometrijsku optiku za tumačenje prolaska svjetlosti kroz usku pukotinu, a valnu optiku za tumačenje prolaska svjetlosti kroz široku pukotinu, dok je učenik 1A stvorio hibridni model optike kombinirajući kvantno-mehaničke efekte s valnim modelom.

Uočene su zanimljive razlike između hrvatskih i austrijskih učenika. Najuočljivija razlika bila je u pristupu objašnjavanju pojava valne optike. Rezultati su pokazali da su hrvatski učenici pojave valne optike objašnjavali i argumentirali koristeći valni model svjetlosti, dok su austrijski učenici pojave u valnoj optici pokušavali objašnjavati koristeći hibridni kvantno-mehanički model. Austrijski su učenici nedugo prije provođenja intervjua, prije nastavne cjeline Valna optika, obrađivali teme vezane uz kvantnu mehaniku, što bi mogao biti uzrok korištenja hibridnog modela. Nastavni program i kurikulum iz fizike u Austriji nije unaprijed određen, dok se u Hrvatskoj kvantna mehanika tipično ne obrađuje prije cje-

line Valne optike. Stoga bi sam hrvatski kurikulum mogao biti razlog nešto većeg uspjeha i točnosti u odgovorima hrvatskih učenika.

Teško je razlikovati interferencijski i ogibni uzorak bez da je prije viđen, jer to nisu pojave koje se viđa svakodnevno. Zbog toga su u ovom području fizike iznimno važni pokusi.

Analizom cjelokupnog istraživanja, razumijevanje valne optike ispitanih učenika srednje škole može biti opisano kao nedovoljno. Prijašnja i sadašnja istraživanja pokazuju da učenici imaju interes za pojave u valnoj optici, ali često primjenjuju pogrešne modele. Pri poučavanju valne optike izrazito je važno ispitati učenike o njihovim zapažanjima i objašnjenjima eksperimentalnih uzoraka karakterističnih za tipične pojave. U poučavanje bi trebalo biti uključeno više pokusa i konceptualnih pitanja kako bi se učenicima olakšala procjena i razumijevanje valnih modela. Dakle, promatrajući rezultate moglo bi se zaključiti da su učenici upoznati s pojmom interferencije, no nitko od njih nije u potpunosti razumio interferenciju kao pojavu.

## Razvoj i primjena konceptualnog testa iz valne optike

Na temelju literature o istraživanjima iz svijeta i rezultata intervjua s hrvatskim srednjoškolcima razvijen je novi konceptualni test o valnoj optici [7], te primijenjen na 224 učenika četvrtih razreda gimnazije iz Zagreba. Prije istraživanja učenici su 4-5 tjedana obrađivali gradivo valne optike na redovnoj nastavi, dva ili tri nastavna sata tjedno (ovisno o vrsti gimnazije). Istraživanju je pristupilo 145 učenica, 77 učenika, dok dva učenika nisu specificirala spol.

Test je uključivao pitanja o interferenciji, ogibu i polarizaciji svjetlosti a za potrebe ovog rada izdvojena su samo ona vezana uz interferenciju. Test je sadržavao 26 pitanja s po četiri ponuđena odgovora, od kojih je učenik trebao izabrati jedan kao točan. Predviđeno vrijeme rješavanja napravljenog testa bilo je 45 minuta, no većina učenika završila je s rješavanjem u 30 minuta. Slijede pitanja i odgovori izdvojena iz istraživanja [7], a vezana uz interferenciju, točni odgovori i postotak točnih odnosno netočnih odgovora, pri čemu su točni odgovori označeni zelenom bojom.

### Analiza odgovora

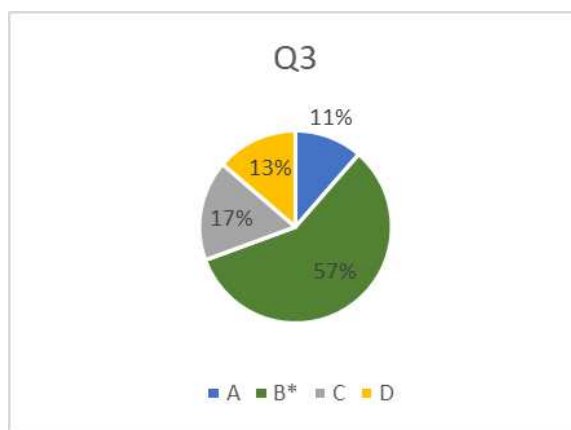
**1.pitanje:** Q3 Koherentne zrake svjetlosti prolaze kroz dvije pukotine, u fazi, i u točki T na zaslonu interferiraju destruktivno. Koliko iznosi razlika putova zraka svjetlosti koje prolaze kroz dvije pukotine u točki T?

A: Razlika putova jednaka je neparnom broju valnih duljina, jer se u točki T mora susresti brijeg jedne zrake svjetlosti s dolom druge zrake svjetlosti.

B: Razlika putova jednaka je neparnom broju polovina valnih duljina, jer se u točki T mora susresti brijeg jedne zrake svjetlosti s dolom druge zrake svjetlosti.

C: Razlika putova jednaka je cijelom broju valnih duljina, jer se u točki T mora susresti dol jedne zrake svjetlosti s dolom druge zrake svjetlosti.

D: Razlika putova jednaka je neparnom broju polovina valnih duljina, jer se u točki T mora susresti dol jedne zrake svjetlosti s dolom druge zrake svjetlosti.



Slika 2.3: Graf postotaka odgovora na pitanje Q3 [7]

**OČEKIVANJE:** Očekivani točan odgovor na ovo pitanje je odgovor B, ali se može pretpostaviti da će učenici često birati i A budući da se spominje susret brijega jedne i dola druge zrake svjetlosti.

**ODGOVOR:** Točno je na ovo pitanje odgovorilo više od polovine učenika, 57%. Suprotno očekivanjima, 30 % učenika biralo je odgovore C i D u kojima se spominje susret dolova oba vala, što bismo mogli objasniti time da su ti učenici smatrali preklapanje dolova destruktivnom interferencijom. Oni koji su odabrali odgovore C i A pokazali su i nepoznavanje matematičkog uvjeta interferencije.

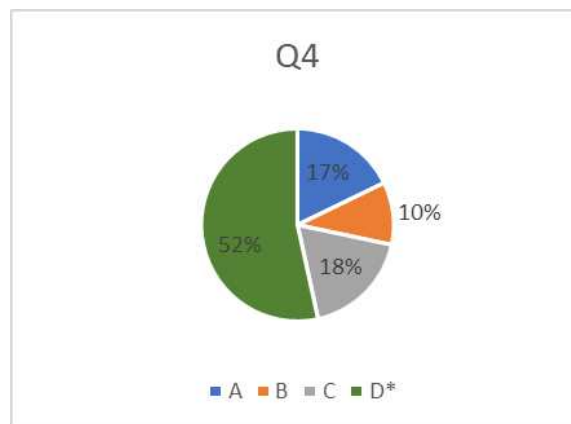
**2.pitanje:** Q4 Dva koherentna izvora svjetlosti  $S_1$  i  $S_2$ , koja su u fazi, emitiraju valove valne duljine  $\lambda$  i amplitude A. Valovi se susretnu u točki T. Razlika udaljenosti  $S_1T$  i  $S_2T$  je  $5\lambda$ . Koliko će iznositi amplituda resultantnog vala u točki T?

A: Nula, jer će se valovi potpuno poništiti.

B:  $A/2$ , jer će se valovi djelomično poništiti.

C: A, jer oba vala imaju amplitudu A.

D:  $2A$ , jer će se valovi zbrojiti i pojačati.



Slika 2.4: Graf postotaka odgovora na pitanje Q4 [7]

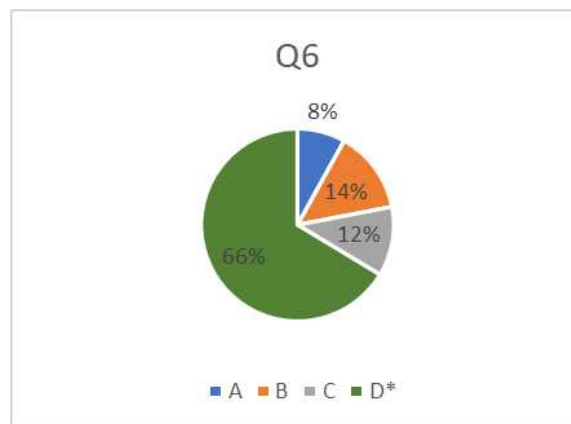
**OČEKIVANJE:** Očekivani odgovor jest D. Razlika putova je dana u zadatku i iznosi  $5\lambda$ , te je trebalo primijeniti uvjet interferencije i zaključiti da se pri konstruktivnoj interferenciji amplituda udvostručuje.

**ODGOVOR:** I na ovo pitanje je više od polovine učenika točno odgovorilo, 52%, dok su odgovori A i C bili podjednako zastupljeni. Odgovor A mogli su dati učenici koji su zamijenili konstruktivnu i destruktivnu interferenciju (učenici ponekad smatraju da razlika putova jednaka neparnom broju valnih duljina izaziva destruktivnu interferenciju), a odgovor C učenici koji možda smatraju, poput južnoafričkih studenata, da je interferencija usrednjavanje, pa jednaki valovi ne mijenjaju amplitudu.

**3.pitanje:** Q6 Koji se od navedenih fenomena može objasniti jedino valnim modelom svjetlosti?

- A: Refleksija svjetlosti.
- B: Lom svjetlosti.
- C: Pravocrtno širenje svjetlosti.
- D: Interferencija svjetlosti.





Slika 2.5: Graf postotaka odgovora na pitanje Q6 [7]

**OČEKIVANJE:** Na ovo pitanje sam očekivala veliku većinu točnih odgovora, tj. odgovor D, budući da prije valne optike stoji tema geometrijske optike u kojoj se spominje pravocrtno širenje, lom i refleksija svjetlosti

**ODGOVOR:** Iako je ovo najbolje odgovoreno pitanje vezano uz interferenciju, s postotkom od 66% točnih odgovora, 34% učenika nije svladalo valni model svjetlosti, te su netočni odgovori podjednako raspodijeljeni.

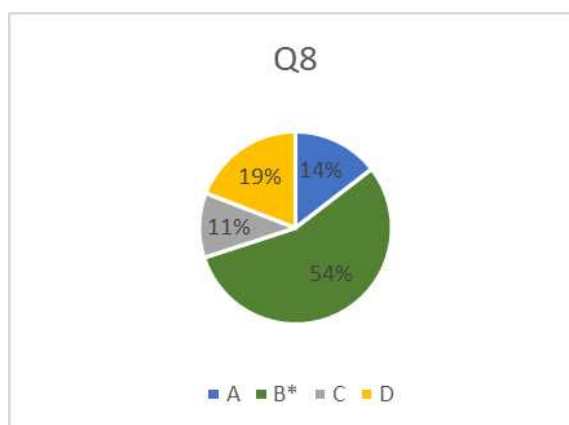
**4.pitanje:** Q8 Što od navedenog općenito predstavlja geometrijsku razliku putova dva svjetlosna vala u nekoj točki T?

A: Udaljenost između izvora svjetlosnih valova.

B: Razlika udaljenosti svakog od izvora valova svjetlosti do točke T.

C: Razlika elongacija dvaju valova u točki T.

D: Razlika valnih duljina dvaju valova.

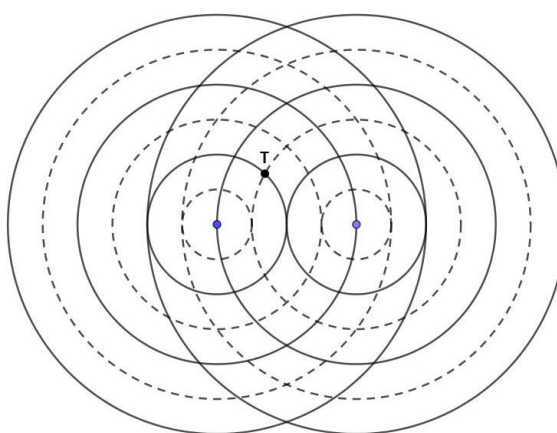


Slika 2.6: Graf postotaka odgovora na pitanje Q8 [7]

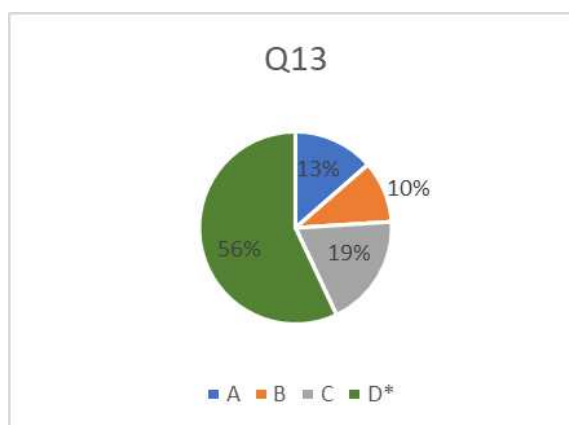
**OČEKIVANJE:** Očekivani odgovor na ovo pitanje je B. Ovo je temeljan pojam u valnoj optici, no učenici s njime imaju problema. Da je pitanje postavljeno s pojmom razlike hoda, umjesto razlike putova, vjerojatno bi učenicima bilo još teže.

**ODGOVOR:** I na ovo pitanje je više od polovine učenika točno odgovorilo, 54%. Drugi najpopularniji odgovor je netočan odgovor D, da razliku putova predstavlja razlika valnih duljina dvaju valova, što pokazuje da učenici nisu savladali povezanost interferencije i razlike putova kao što je i navedeno kod učeničkih poteškoća ranije u radu.

**5.pitanje:** Q13 Crtež shematski prikazuje dva koherentna izvora svjetlosti. Svjetlosni valovi predstavljeni su valnim frontama, gdje isprekidane linije predstavljaju dolove valova, a pune linije vrhove brjegovova valova. Valna duljina valova je  $\lambda$ . Kako će svjetlosni valovi iz ova dva izvora interferirati u označenoj točki T?



- A: Konstruktivno, jer je razlika putova valova od dvaju izvora do točke T jednaka  $\lambda$ .  
 B: Konstruktivno, jer je razlika putova valova od dvaju izvora do točke T jednaka  $\lambda/2$ .  
 C: Destruktivno, jer je razlika putova valova od dvaju izvora do točke T jednaka  $\lambda$ .  
 D: Destruktivno, jer je razlika putova valova od dvaju izvora do točke T jednaka  $\lambda/2$ .



Slika 2.7: Graf postotaka odgovora na pitanje Q13 [7]

**OČEKIVANJE:** Očekivani odgovor je D, budući da sa slike učenici mogu uočiti da se u točki T susreću crkana i puna linija, tj. brijeg i dol vala, što čini destruktivnu interferenciju, a prebrojavanjem valnih duljina od jednog i drugog izvora do točke T može se odrediti i razlika putova od  $\lambda/2$ .

**ODGOVOR:** Više od polovine ispitanika je točno odgovorilo na ovo pitanje, njih 56%. Drugi najpopularniji odgovor je po očekivanju odgovor C u kojem je razlika putova jednaka  $\lambda$ , a interferencija destruktivna. Odgovori sugeriraju da 44% učenika nije shvatilo uvjete konstruktivne odnosno destruktivne interferencije i/ili imaju problema s prikazom valova pomoću kružnih fronti i određivanjem razlike putova iz takvog prikaza.

**6.pitanje:** Q15 Slika prikazuje eksperimentalni postav s nepoznatim optičkim elementom X.

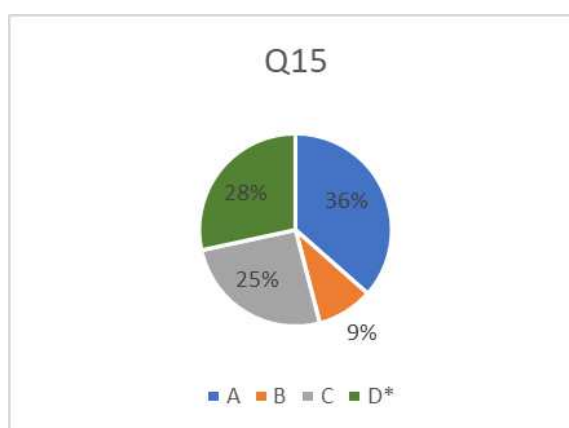


Sljedeća slika je dobivena na zaslonu s tim postavom:



Što je korišteno kao element X u eksperimentalnom postavu?

- A: Optička rešetka.
- B: Vrlo široka pukotina.
- C: Vrlo uska pukotina.
- D: Dvije vrlo uske pukotine.



Slika 2.8: Graf postotaka odgovora na pitanje Q15 [7]

**OČEKIVANJE:** Na ovo pitanje očekivani točan odgovor je D, dvije uske pukotine, budući da je prikazan uzorak koji odgovara onome iz Youngovog pokusa. Moglo se očekivati da će dio učenika zamijeniti to optičkom rešetkom, jer su uzorci slični.

**ODGOVOR:** Samo je 28% učenika odgovorilo točno na ovo pitanje, a gotovo jednak udio učenika, 25%, odgovorio je odgovorom C (vrlo uska pukotina). Najviše odgovora, 36%, bilo je odgovora A optička rešetka, što je drugi očekivani odgovor. Odgovori su u skladu s rezultatima nekih hrvatskih istraživanja da učenici imaju značajnih problema s razlikovanjem tipičnih eksperimentalnih uzoraka u valnoj optici. [8] U globalu, malo više od četvrtine učenika je bilo na dobrome tragu, što pokazuje da su poteškoće u raspoznavanju uzoraka prisutne kod hrvatskih srednjoškolaca.

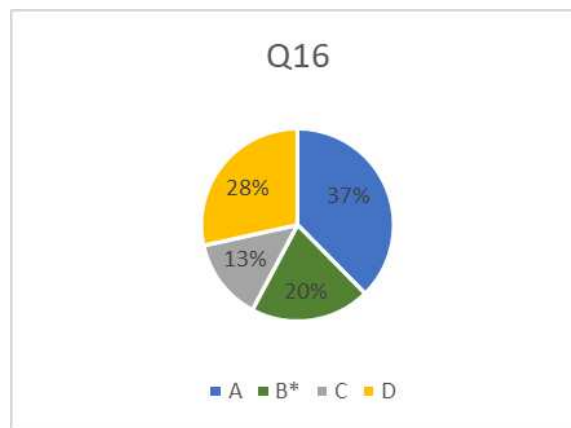
**7.pitanje:** Q16 Svjetlost dviju identičnih žarulja pada na isto područje zastora. Što će se vidjeti na zastoru?

A: Interferencijski uzorak, jer su žarulje koherentni izvori svjetlosti.

B: Približno ravnomjerno osvijetljeno područje, jer su žarulje nekoherentni izvori svjetlosti.

C: Interferencijski uzorak, jer su žarulje identične.

D: Približno ravnomjerno osvijetljeno područje, jer su žarulje koherentni izvori svjetlosti.

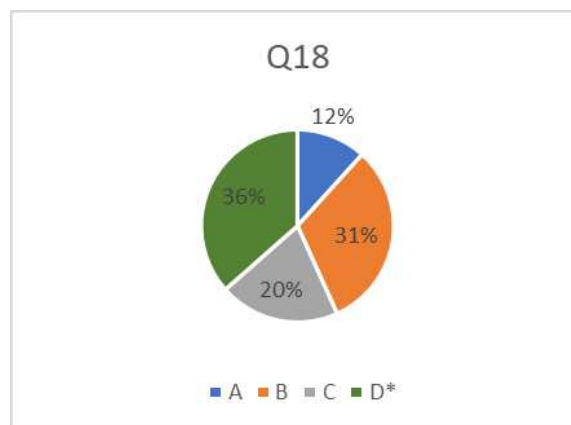
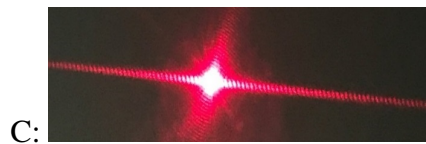
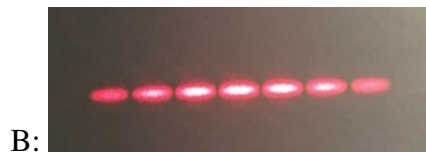
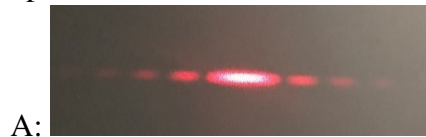


Slika 2.9: Graf postotaka odgovora na pitanje Q16 [7]

**OČEKIVANJE:** U ovom slučaju je očekivani točan odgovor B, Učenici bi trebali razumjeti da dva nezavisna izvora (npr. dvije žarulje) ne mogu biti koherentni izvori, a i uočiti da se u svakodnevnom životu ne pojavljuju interferencijski uzorci pri uključivanju više nezavisnih izvora svjetlosti.

**ODGOVOR:** Točan odgovor je da će područje biti ravnomjerno osvijetljeno, što je odgovorilo samo 20% učenika. Najviše je učenika odgovorilo s A, a zatim s D, jer su identične žarulje smatrali koherentnim izvorima svjetlosti, čime pokazuju nerazumijevanje tog pojma.

**8.pitanje:** Q18 Koja je od sljedećih slika dobivena prolaskom laserske svjetlosti kroz optičku rešetku?



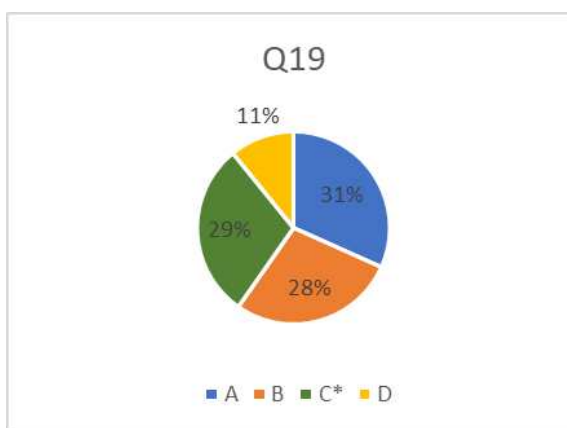
Slika 2.10: Graf postotaka odgovora na pitanje Q18 [7]

**OČEKIVANJE:** Očekivani točan odgovor je D, kojega bi učenici u nastavi valne optike trebali susresti i naučiti raspoznavati u odnosu na druge uzorke.

**ODGOVOR:** Na ovo pitanje točno je odgovorilo samo 36% učenika dok je drugi najpoželjniji odgovor, 31%, uzorak dobiven interferencijom na dvije uske pukotine. Ovim odgovorima potvrđeno je neraspoznavanje danih uzoraka.

**9.pitanje:** Q19 U Youngovom eksperimentu s dvije pukotine, koristite zeleno lasersko svjetlo i uočite da su susjedni maksimumi na ekranu preblizu da biste izmjerili razmak između njih. Koja bi od sljedećih promjena mogla povećati razmak između susjednih maksimuma na zaslonu?

- A: Povećanje razmaka između pukotina.
- B: Približavanje zaslona pukotinama.
- C: Korištenje svjetla veće valne duljine.
- D: Korištenje svjetla manje valne duljine.



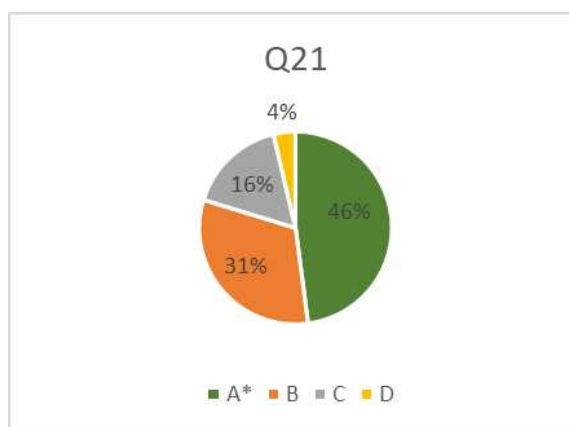
Slika 2.11: Graf postotaka odgovora na pitanje Q19 [7]

**OČEKIVANJE:** Točan odgovor C opet zahtijeva poznavanje i razumijevanje matematičkog opisa interferencije i/ili iskustvo s provođenjem Youngovog pokusa. Razmaci između maksimuma će se povećati povećanjem valne duljine izvora svjetlosti.

**ODGOVOR:** Netočni odgovori A i B, povećanje razmaka među pukotinama i približavanje zaslona pukotinama, u jednakoj su mjeri odabrani kao i točan odgovor. Ta činjenica nije neobična, jer je ranije u radu kao jedna od učeničkih poteškoća naveden problem s predviđanjima i pretpostavkama što će se dogoditi s interferencijskim uzorkom ako se neko svojstvo optičkog postava promijeni.

**10.pitanje:** Q21 Crveno lasersko svjetlo pada na dvije uske vertikalne paralelne pukotine. Zaslون je postavljen na jedan metar od pukotina. Ako zaslon postavimo na tri metra od pukotina, kakvu promjenu uzorka na ekranu možemo očekivati?

- A: Razmak između susjednih maksimuma bit će tri puta veći nego prije.
- B: Razmak između susjednih maksimuma bit će tri puta manji nego prije.
- C: Razmak između susjednih maksimuma bit će isti kao i prije.
- D: Razmak između susjednih maksimuma ovisit će o intenzitetu ulaznog svjetla



Slika 2.12: Graf postotaka odgovora na pitanje Q21 [7]

**OČEKIVANJE:** Očekivani točan odgovor je A.

**ODGOVOR:** Najveći je udio točnih odgovora, skoro polovina ispitanih učenika, a sljedeći najbiraniji odgovor bio je B. Budući da je nekoliko pitanja prije u istraživanju bilo pitanje vezano uz promjenu jednog svojstva optičkog sustava, na kojem su odgovori bili jednoliko raspodijeljeni, bilo je za očekivati da će neki učenici povezati ta dva pitanja na dobar način i odgovoriti točno, ali da će biti i onih koji će povezati krivo. Odgovor na ovo pitanje još je jedan od dokaza da i hrvatski srednjoškolci imaju poteškoća s predviđanjima što će se dogoditi s interferencijskim uzorkom ukoliko se promijeni jedno svojstvo optičkog sustava, kao i s proporcionalnim zaključivanjem na temelju matematičke veze među veličinama.

**11.pitanje:** Q22 Zašto opažamo naizmjenične minimume i maksimume svjetla na zastoru nakon prolaska laserskog svjetla kroz optičku rešetku?

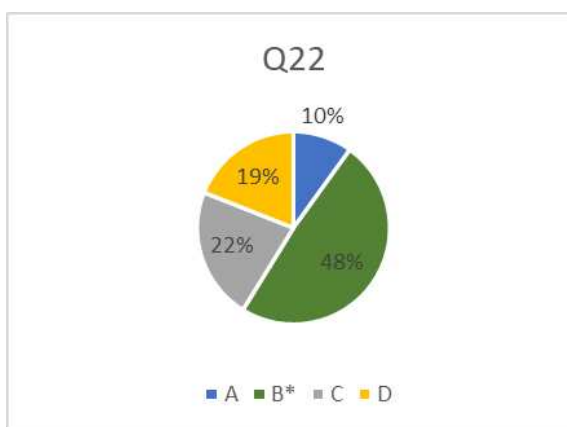
A: Na optičkoj rešetki svjetlost se reflektira pod različitim kutovima i zato vidimo minimume i maksimume na različitim mjestima na zastoru.

B: Svaki prorez optičke rešetke djeluje kao točkasti izvor, tako da na zastoru vidimo interferencijski uzorak svjetlosti iz svih tih izvora, koji se sastoji od minimuma i maksimuma.

C: Svaki prorez na optičkoj rešetki propušta svjetlost i proizvodi vlastiti maksimum, dok je svjetlost blokirana između proreza, tvoreći minimume.

D: Na optičkoj rešetki svjetlost se lomi pod različitim kutovima, pa se zato maksimumi stvaraju samo pod određenim kutovima, dok su minimumi između njih.





Slika 2.13: Graf postotaka odgovora na pitanje Q22 [7]

**OČEKIVANJE:** Očekivani odgovor je B, ako su učenici razumjeli Youngov pokus i Huygensovo načelo.

**ODGOVOR:** Skoro polovina učenika i na ovo je pitanje odgovorila točno, što može značiti da su shvatili Huygensovo načelo i funkcioniranje optičke rešetke. Drugi najpopularniji odgovor ipak je bio C, jer su učenici možda djelovanje optičke rešetke pojednostavljeno shvatili kao da pukotine propuštaju svjetlost, čime se dobiju maksimumi, a razmak između pukotina ju ne propušta, što uzrokuje minimume. Odgovor D odgovoren je za samo 3% manje čest, 19%, što ukazuje na to da dio učenika ne razumije dobro pojavu interferencije i pokušavaju je objasniti geometrijskom optikom.

### Analiza i rezultati istraživanja

Pitanja Q6 i Q8 su pitanja koja obuhvaćaju znanje osnovnih valnih koncepata i valnog modela svjetlosti, a Q3, Q4 i Q13 primjenu matematičkih uvjeta za interferenciju svjetlosti dvaju izvora. Zaključivanje na temelju pokusa iz interferencije u školi obuhvaćaju pitanja Q19 i Q21, dok su pitanja Q15 i Q18 pitanja koja obuhvaćaju poznavanje i razlikovanje interferencijskih i ogibnih uzoraka koji se uvode u srednjoj školi. Pitanjima Q16 i Q22 obuhvaćeno je obrazlaganje fenomena valne optike i njihova primjena u svakodnevnim situacijama.

Rezultati istraživanja pokazuju da je na sedam od jedanaest pitanja vezanih uz interferenciju svjetlosti oko polovina ispitanih učenika dala točan odgovor, dok je na četiri od jedanaest pitanja točnih odgovora bilo samo dvadesetak posto.

Dobivenim rezultatima pokazano je da i među hrvatskim srednjoškolcima vlada nerazumijevanje pojave interferencije svjetlosti. Već ranije navedene poteškoće među studentima uočene su i kod srednjoškolaca. Prije svega, tu je neprepoznavanje interferencijskog uzorka dobivenog iz dva izvora, tj. dvije pukotine, što je pokazano pitanjem Q18 u kojem je samo

36 % učenika točno odgovorilo. Zatim su prisutne poteškoće s povezivanjem interferencije s razlikom putova svjetlosti koje sugeriraju odgovori na pitanja Q3 i Q8, a pokazuje da čak polovina ispitanih učenika nije razumjela smisao i važnost razlike putova. Još jedna od ranije uočenih poteškoća je poteškoća u povezivanju interferencijskog uzorka s karakteristikama optičkog sustava. Ta je poteškoća kod hrvatskih srednjoškolaca pokazana u pitanjima Q19 i Q21, koja su točno odgovorena od samo 29%, odnosno 46% učenika. Kod južnoafričkih je studenata uočeno nerazumijevanje načela superpozicije i mišljenje da se interferencija ne odnosi na jednake valove. Ta je ideja možda pokazana i kod hrvatskih srednjoškolaca odgovorom C na pitanje Q4, koji je dalo samo 18% učenika. Uočeni su značajni problemi s nerazpoznavanjem tipičnih eksperimentalnih uzoraka.

Na temelju prethodnih i ovog istraživanja može se zaključiti da su poteškoće kod razumijevanja pojave interferencije svjetlosti itekako prisutne, te da bi na tu pojavu trebalo utrošiti znatno više vremena kako bi ju učenici shvatili. Drugi način koji bi učenicima olakšao shvaćanje je promjena pristupa poučavanja u smislu istraživački usmjerene nastave, kako bi učenici pri poučavanju pojave interferencije bili aktivno uključeni u samo istraživanje pojave, bolje ih upoznali i razlikovali.

### **Zaključak istraživanja**

Nemoguće je stvoriti koherentni model za promatranje svjetlosti kao vala, a da se ne zna razlikovati i povezati osnovne ideje i pojmove poput valne duljine, razlike putova, razlike u fazi i slično. Ovim istraživanjem još su jednom pokazane poteškoće hrvatskih srednjoškolaca s pojavom interferencije, koje su detektirane u ranijim, sličnim istraživanjima u svijetu i kod nas, a navedene su ranije u radu. Osobito se uočava problem nerazlikovanja eksperimentalnih uzoraka i poteškoća sa zaključivanjem o eksperimentalnim situacijama, što upućuje na važnost većeg uključivanja pokusa u nastavu fizike.

## Poglavlje 3

# Nastavni pristup interferenciji svjetlosti

### 3.1 Interferencija svjetlosti u kurikulumu Fizike

Najnoviji kurikulum, donesen 2019.godine, za nastavni predmet Fizika za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj [2], četverogodišnje učenje fizike u gimnazijama dijeli na dva modela, onaj s dva sata tjedno (4x2) i onaj s tri sata nastave tjedno (4x3). Sama fizika obuhvaća širok spektar pojava, spoznaja i zakonitosti prirode, pa je sadržaj predmeta podijeljen na domene. Domene su izabrane na način da se podudaraju s domenama prirodoslovlja, a u fizici su to sljedeće domene: Struktura tvari (A), Međudjelovanja (B), Gibanje (C) i Energija (D). Podjela na spomenute domene sugerira isprepletenost sadržaja, a učenike navodi na bolje shvaćanje uzročnosti i povezanosti prirodnih pojava.

#### Model 4x2 (4x70 sati)

U općoj gimnaziji, model je 70 sati, što su 2 sata tjedno, a fizika je obavezan predmet kroz sva četiri razreda. Isti model se primjenjuje i u klasičnim i jezičnim gimnazijama, no fizika je u jezičnim gimnazijama obavezan predmet samo u prva dva razreda, dok je u druga dva izboran.

Interferencija se u sklopu nastavne cjeline Valovi, u domenama C i D, spominje već u trećem razredu, a odgojno-obrazovni ishodi koji ju obuhvaćaju su FIZ SŠ C.3.5 i FIZ SŠ D.3.5 – Objašnjava nastanak vala i analizira valna svojstva, pri čemu je razrada tog ishoda – Objašnjava interferenciju. [2]

Interferencija svjetlosti pojavljuje se u prvoj nastavnoj cjelini četvrtog razreda, Svjetlost kao elektromagnetski val, kao zasebna nastavna jedinica. Ishodi vezani uz valnu optiku, točnije interferenciju svjetlosti su FIZ SŠ C.4.1 i FIZ SŠ D.4.1 – Analizira valnu prirodu svjetlosti, s razradom tog ishoda – Analizira interferenciju svjetlosti. Od učenika se na kraju razreda očekuje da mogu objasniti Youngov pokus i opisati pojavu interferencije svjetlosti i njene primjene u tehnologiji. Glavni pojmovi koje bi učenici trebali poznavati i

shvatiti su osim interferencije svjetlosti, koherentnost izvora svjetlosti i interferencija svjetlosti na optičkoj rešetki.

Za ostvarivanje odgojno-obrazovnog ishoda FIZ SŠ ABCD.4.10 – Istražuje fizičke pojave, učenici trebaju izvoditi pokuse (samostalno, u paru ili u skupini) tijekom učenja, pri čemu neki trebaju uključivati i mjerenja, sudjelovati u učenju koristeći se računalnim simulacijama ili demonstracijskim pokusima, te izborno, izvan nastave izvesti jedan učenički projekt (samostalno, u paru ili u skupini). Pokusi predloženi u kurikulumu, a povezani s interferencijom svjetlosti uključuju istraživanje Youngovih pruga interferencije i mjerenje konstante optičke rešetke. [2]

### **Model 4x3 (4x105 sati)**

U prirodoslovno-matematičkim gimnazijama koristi se model od 105 sati, što je 3 sata fizike tjedno, a fizika je obavezan predmet u sva četiri razreda.

Kao i u modelu 4x2, interferencija se prvi put spominje u trećem razredu u vidu istih odgojno-obrazovnih ishoda, u sklopu cjeline Valovi.

Interferencija svjetlosti se također pojavljuje kao nastavna jedinica unutar cjeline Svjetlost kao elektromagnetski val. Ishodi FIZ SŠ C.4.1. i FIZ SŠ D.4.1. proširuju se na način da je u razradi tih ishoda osim objašnjenja Youngovog pokusa potrebno znati i njegov matematički opis, a preporučuje se u sklopu navedenih ishoda primjenjivati zadatke nešto veće složenosti. Da bi navedeni odgojno-obrazovni ishodi bili ostvareni preporuka je analizirati utjecaj valne duljine na interferencijsku sliku u Youngovom pokusu i na optičkoj rešetki, te provesti istraživanja interferencije svjetlosti iz dvaju izvora (Youngov pokus).

Za ostvarivanje ishoda FIZ SŠ C.4.10. i FIZ SŠ D.4.10. – Istraživanje fizičkih pojava, predlažu se pokusi, kao i u modelu 70 sati, istraživanja Youngove pruge interferencije i mjerenje konstante optičke rešetke. [2]

Kao preporuka za ostvarivanje odgojno-obrazovnih ishoda u oba modela navedeno je da je potrebno poznavati i uzeti u obzir učenikove postojeće ideje i znanja jer će oni izravno utjecati na kvalitetu i točnost mentalnih modela koji će se formirati u procesu učenja.

U preporuci kurikuluma također piše da kod ostvarivanja ishoda vezanih uz svjetlost prednost treba dati pokusima koje što češće trebaju izvoditi učenici, a moguće je primjenjivati i snimljene pokuse ili računalne simulacije. [2]

Odgojno-obrazovni ishodi na razini ostvarenosti »dobar« na kraju razreda vezani uz nastavnu cjelinu Valna optika su sljedeći:

- Samostalno izvodi eksperiment.
- Objašnjava teorijsku podlogu.
- Ovisnost varijabla izražava u matematičkom obliku.
- Uspoređuje rezultate mjerenja s modelom.
- Vrednuje proceduru i rezultate mjerenja.
- Analizira odnose između varijabli
- Izgrađuje argumente utemeljene na znanstvenim dokazima.
- Objašnjava pojavu u prirodi, prikazanu pokusom ili računalnom simulacijom.
- Opisati interferenciju svjetlosti u prirodi (mjehur sapunice).
- Provesti istraživanje o interferenciji svjetlosti iz dvaju izvora (Youngov pokus). [2]

## 3.2 Interferencija svjetlosti u standardnoj nastavnoj praksi

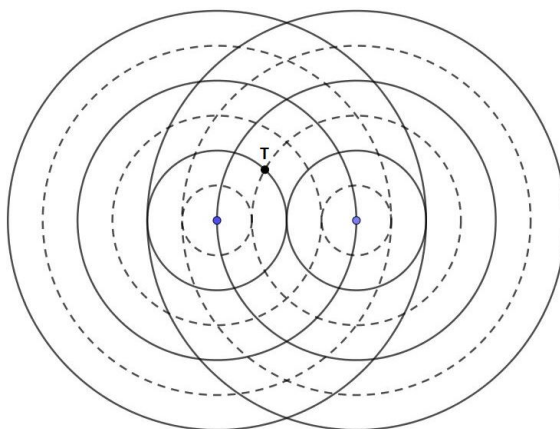
U nastavi se Interferencija svjetlosti, kako je dano i kurikulumom, obrađuje kao zasebna jedinica unutar nastavne cjeline Svjetlost kao elektromagnetski val, Fizikalna optika, Valna optika ili slično.

U standardnoj nastavi fizike i nekim udžbenicima, sat u kojem se obrađuje interferencija svjetlosti započinje prisjećanjem trećeg razreda, u kojem se nalazilo gradivo interferencije mehaničkih valova. Spominje se i konstruktivna i destruktivna interferencija te interferencijski maksimumi, kao titranja maksimalnog intenziteta i interferencijski minimumi kao titranja minimalnog intenziteta, odnosno odsutnost titranja. Koristeći se za početak valovima na vodi pokazuje se da se položaji interferencijskim maksimuma i minimuma u prostoru sredstva tijekom interferencije ne mijenjaju, zato što je fazni pomak između dva vala stalan u vremenu. Uvodi se i pojam koherentnih valova, što su valovi jednakih valnih duljina i amplituda, između kojih je stalan fazni pomak, te je razlika putova valova od izvora do proizvoljne točke sredstva također stalna.

Zatim se spominje da je i svjetlost val, te da pojava interferencije valova vrijedi i za svjetlost, ali su interferencijski maksimumi područja jačeg intenziteta svjetlosti, tj. svijetle

pruge, a interferencijski minimumi područja tame, odnosno tamne pruge. Kako bi interferencija svjetlosti bila moguća potrebna su dva izvora svjetlosti, te je moguće pokazati da interferenciju nije moguće ostvariti koristeći LED-diode ili obične žarulje, već kako je napomenuto ranije, izvori svjetlosti trebaju biti koherentni. Zbog toga se postavlja pitanje kako dobiti dva koherentna vala, tj. dva koherentna izvora svjetlosti? [9, 10, 11]

Nacrtaju se dva koherentna izvora svjetlosti, prikazana u istom trenutku, s naznačenim valnim frontama, gdje pune linije označavaju vrhove brjegov valova, a crtkane linije označavaju dolove valova, kao na slici 3.1.



Slika 3.1: Shematski prikaz interferencije valova iz dvaju izvora [7]

Koristeći se već poznatim pojmovima, učenicima se objasni da do konstruktivne interferencije dolazi pri susretu brijega jednog i brijega drugog vala ili dola jednog s dolom drugog vala. Razlika putova valova do neke točke prostora, koju označavamo s  $\delta$ , u tom je slučaju uvijek jednaka cijelom broju valnih duljina ili nuli:  $\delta = k\lambda$ , za  $k = 0, 1, 2, \dots$

Osim konstruktivne javlja se i destruktivna interferencija i to pri susretu brijega jednog s dolom drugog vala. Razlika putova valova u tim točkama jednaka je neparnom broju polovina valnih duljina:  $\delta = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}$ , za  $k = 1, 2, \dots$  [10]

Ovime nije odgovoreno na postavljeno pitanje kako dobiti dva koherentna izvora svjetlosti, pa je sljedeće što se na satu spominje Youngov pokus s dvije pukotine. Da bi dobio koherentne izvore svjetlosti Thomas Young je koristio bijelu svjetlost, dvije pukotine i zaslon na kojem je uzorak bio projiciran. Na zaslonu se dobiva interferencijski uzorak, pri čemu se središnja svijetla pruga nalazi na simetrali spojnice izvora, u točki koja probada zaslon za projiciranje, što učenici mogu uočiti ukoliko je pokus izveden (ne nužno sa bijelom svjetlosti, već nekom monokromatskom laserskom svjetlosti) ili u simulaciji. [11]

Za opis Youngovog pokusa, tj. interferencije svjetlosti na dvije pukotine izvode se ili samo daju izrazi za računanje udaljenosti  $k$ -te svijetle pruge od središnje:  $s_k = k\lambda \frac{a}{d}$ , za  $k = 1, 2, 3, \dots$ , gdje je  $k$  redni broj svijetle pruge,  $a$  udaljenost od izvora do zaslona za projiciranje, a  $d$  razmak između izvora. [11]

Ukoliko ostane dovoljno vremena, što je rijetko slučaj, izvodi se pokus (ili simulacija) u kojoj se dvije pukotine obasjavaju najprije zelenom monokromatskom svjetlošću, a zatim crvenom. Cilj pokusa je da učenici uoče da je razmak između susjednih svijetlih (ili susjednih tamnih) pruga kod zelene svjetlosti manji nego kod crvene svjetlosti. Učenici bi to trebali shvatiti i iz izvedenog ili danog izraza, budući da je valna duljina proporcionalna s udaljenosti između pruga.

Potom se u sljedećem satu obrađuje optička rešetka i izvodi njen matematički opis  $d \sin \alpha = k\lambda$ , te se novi izrazi primjenjuju u rješavanju zadataka.

Za nastavnu jedinicu „Interferencija svjetlosti“ obično su predviđena 3 nastavna sata. Nastavna jedinica u standardnoj praksi ponekad uključuje demonstracijske pokuse ili projiciranje uzoraka, ali vrlo rijetko učeničke pokuse vezane uz interferenciju svjetlosti.

### **3.3 Interferencija svjetlosti u istraživački usmjerenoj nastavi fizike**

Vrsta nastave kojom se pokušava izgraditi učeničko razumijevanje svih fizikalnih sadržaja i njihovo znanstveno zaključivanje kroz strukturirana i vođena učenička istraživanja naziva se istraživački usmjerena nastava fizike. [1] Učenike se usmjerava i potiče na razmišljanje, logičko zaključivanje, osmišljavanje i provođenje pokusa i testiranje hipoteza.

Na taj način učenicima se želi približiti fizika kao znanstvena disciplina koja je u svojoj suštini istraživačka znanost. Samo frontalno demonstriranje pokusa od strane nastavnika ne smatra se istraživački usmjerenom nastavom. Da bi nastava bila istraživački usmjerena učenici moraju aktivno sudjelovati u promišljanju i izvođenju pokusa, a ne biti samo pasivni promatrači. Osmišljenim pitanjima i nastavnim listićima učenike se vodi kroz pokus, dok se raspravom i samostalnim zapisivanjem rezultata želi doći do zaključaka.

Glavni razlozi korištenja istraživački usmjerene nastave fizike su razvijanje istraživačkih vještina i znanstvenog zaključivanja te razvijanje razumijevanja rezultata i procesa znanosti. U tradicionalnom, predavačkom obliku nastave fizike istraživačke vještine i znanstveno zaključivanje se ne mogu u dovoljnoj mjeri razviti. [1] Učenici su prilikom predavačkog oblika nastave fizike, gdje je nastavnik u središtu i frontalno iznosi gradivo, vrlo često intelektualno pasivni. Istraživački usmjerena nastava i interaktivne nastavne metode rezultiraju većim stupnjem intelektualnog angažmana učenika čime se postiže aktivno učenje.

Istraživački usmjereni sat započinje uvodnim problemom u obliku pokusa ili pitanja. Cilj uvodnog problema je poticanje interesa i prikupljanje ideja. Učenici na taj način mogu temu nastavnog sata povezati sa svakodnevnim iskustvima i razviti raspravu. Ukoliko se uvodi nova pojava, sat započinje opservacijskim pokusom, sistematičnim opažanjem po-

kusa i samostalnim zapisivanjem opažanja. Uočavaju se ključni aspekti nove pojave i ona se tada najčešće imenuje.

U središnjem dijelu sata postavlja se istraživačko pitanje (ili više njih) na koje bi učenici, pomoću istraživanja, tj. istraživačkog pokusa, trebali dati odgovor. Bitno je pitanje zapisati i naglasiti ga bi učenici znali na što se trebaju usredotočiti te kako bi dali prijedloge hipoteza i osmislili pokus kojim bi se navedeno moglo istražiti. Poslije izvođenja pokusa učenici skiciraju pokus, zapisuju svoja opažanja i zaključke, nakon čega slijedi sumiranje rezultata na ploči i rasprava. Potom se konstruira matematički model koji opisuje novu pojavu.

U završnom dijelu sata primjenjuje se novi model, kako bi učenici uočili zašto je bitan, a na taj način nastavnik je u mogućnosti procijeniti jesu li učenici i u kojoj mjeri svladali novo gradivo. Novi model je moguće primijeniti i na uvodni problem, a može se nadopuniti drugim eksperimentalnim pitanjima (aplikacijskim pokusom) ili konceptualnim pitanjima s raspravom. [1]

Nastavna sekvenca interferencije svjetlosti u ovom radu strukturirana je u obliku istraživački usmjerene nastave. Prvi sat započinjem problemom postojanja dva modela svjetlosti, valnog i čestičnog, i izvođenjem Youngovog pokusa. Istraživačko pitanje središnjeg dijela sata je: „Kako je nastala slika u Youngovom pokusu?“. Izvođenjem pokusa i kroz diskusiju dolazimo do zaključka sata u kojem zaključujemo da je slika u Youngovom pokusu kompatibilna s valnim modelom svjetlosti te je valni model svjetlosti bolji.

Drugi nastavni sat započinjem prisjećanjem na izgled uzorka koji smo dobili izvođenjem Youngovog pokusa, uočavamo ekvidistantne pruge kao glavno obilježje uzorka pa s učenicima raspravljamo što u Youngovom pokusu utječe na razmak između interferencijskih pruga. Nakon identificiranih varijabli koje bi mogle utjecati na razmak postavljamo tri istraživačka pitanja, Prvi dio istraživanja, „Kako razmak među prugama ovisi o valnoj duljini svjetlosti?“, provodimo frontalno, dok drugi i treći dio istraživanja: „Kako razmak između pruga ovisi o udaljenosti izvora od zaslona?“ i „Kako razmak između pruga ovisi o razmaku između izvora?“, učenici provode u grupama. Krajem sata sumiramo i analiziramo rezultate te dolazimo do zaključka i matematičkog opisa, a učeničko razumijevanje provjerimo s nekoliko konceptualnih pitanja.

Treći nastavni sat povezan s interferencijom svjetlosti započinjemo uvodnim problemom osvjetljavanja puno pukotina umjesto samo dviju, uvođenjem pojma optičke rešetke te izvođenjem opservacijskog pokusa u kojem bi učenici trebali opaziti kako se uzorak dobiven pomoću rešetke razlikuje od uzorka dobivenog Youngovim pokusom. Time dolazimo i do istraživačkog pitanja: „Kako bi se uzorak promijenio da promijenimo konstantu rešetke ili udaljenost od zaslona?“ Razdvojimo ga na dva istraživačka pitanja koja učenici kvalitativno istražuju u grupama: „Kako razmak između pruga ovisi o udaljenosti izvora od zaslona?“ i „Kako razmak između pruga ovisi o konstanti optičke rešetke?“. Na kraju sata izvodimo aplikacijski pokus u kojem kroz optičku rešetku učenici promatraju izvor



bijele svjetlosti, te završavamo sat zaključkom o interferenciji bijele svjetlosti na optičkoj rešetki i konceptualnim pitanjem.

Struktura ovih nastavnih sati je drukčija od predavačkog sata jer je sat prožet učeničkim pokusima, istraživanjima pojava, opažanjima, konceptualnim pitanjima i većom interakcijom u svrhu razvijanja znanstvenog zaključivanja i konceptualnog razumijevanja.

# Poglavlje 4

## Nastavna sekvenca: Interferencija svjetlosti

### 1. SAT: YOUNGOV POKUS – INTERFERENCIJA SVJETLOSTI

Napomena: Pripreme su pripremljene za četverogodišnje učenje fizike, model 4x2, tj. 70 sati godišnje, za učenje fizike u općim, jezičnim i klasičnim gimnazijama.

#### **Obrazovni ishodi:**

**FIZ SŠ C.4.1., FIZ SŠ D.4.1. Analizira valnu prirodu svjetlosti**

**FIZ SŠ C.4.9., FIZ SŠ D.4.9. Rješava fizičke probleme**

**FIZ SŠ C.4.10., FIZ SŠ D.4.10. Istražuje fizičke pojave**

- opisati svjetlost kao val
- razlikovati modele svjetlosti
- opisati pojavu interferencije svjetlosti
- opisati i protumačiti Youngov pokus
- razvijati znanstveno zaključivanje (osmišljanje pokusa, kontrola varijabli, testiranje hipoteza)
- razvijati usmeno, pismeno i grafičko izražavanje
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

**Ishodi međupredmetnih tema:**

osr A.5.3. Razvija svoje potencijale.

uku A.4/5.2. Primjena strategija učenja i rješavanje problema

uku A.4/5.4. Učenik samostalno kritički promišlja i vrednuje ideje.

uku C.4/5.3. Učenik iskazuje interes za različita područja, preuzima odgovornost za svoje učenje i ustraje u učenju.

uku D.4/5.1. Učenik stvara prikladno fizičko okruženje za učenje s ciljem poboljšanja koncentracije i motivacije.

pod A.5.1. Primjenjuje inovativna i kreativna rješenja.

pod B.5.2. Planira i upravlja aktivnostima.

**TIJEK NASTAVNOG SATA****1) UVODNI DIO****UVODNI PROBLEM:**

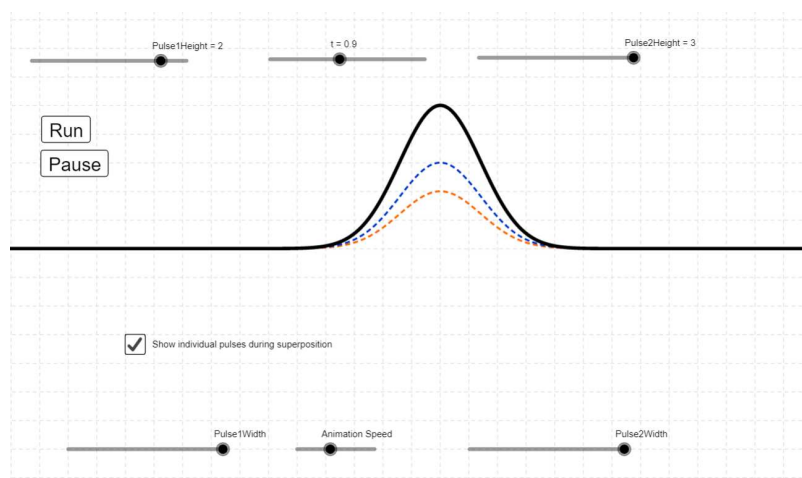
**U 17. stoljeću bila su poznata dva modela kojima su se opisivale svjetlosne pojave. Valni i čestični model svjetlosti. Čestični model zastupao je Newton smatrajući da je svjetlost roj mehaničkih čestica. Valni model zastupao je Huygens, a širenje svjetlosti opisivao analogijom valovima na vodi. Navedenim modelima su se tada mogle objasniti sve poznate pojave vezane uz svjetlost.**

**Kako bismo mogli procijeniti koji je model bolji?**

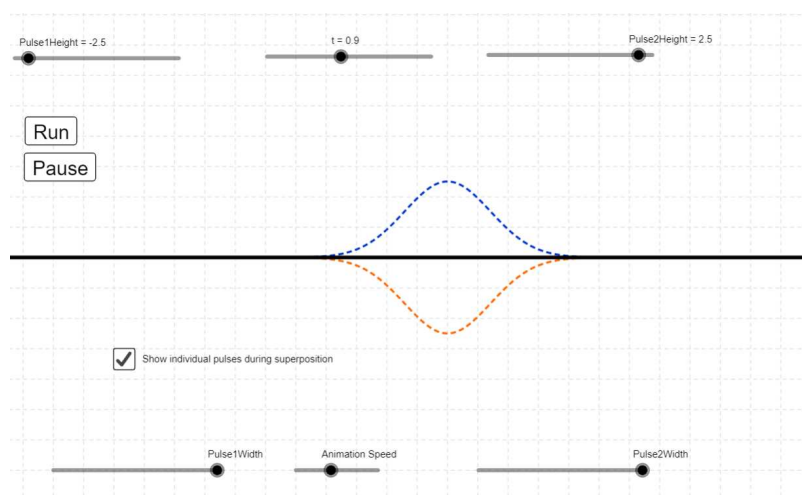
Učenici kroz raspravu dolaze do zaključka da bi bila potrebna neka nova pojava koju bi mogao objasniti samo jedan od ta dva modela. Tada bi model s kojim se može opisati nova pojava bio bolji model.

**Koja pojava razlikuje valove i čestice? Kako međudjeluju dva vala?**

Učenike vodimo do ideje da se valovi mogu pojačati ili oslabiti u međudjelovanju, te je interferencija valova pojava koja je karakteristična za valove, a nemoguća za klasične čestice. Kako međudjeluju dva vala možemo učenike prisjetiti simulacijom:



Slika 4.1: Međudjelovanje dvaju valova, pulsa u fazi [14]



Slika 4.2: Međudjelovanje dvaju valova, pulsa u protufazi [14]

**1801. godine Thomas Young, svestrani znanstvenik, odlučio je istražiti pokazuje li svjetlost pojavu interferencije. Pokus koji je napravio nazivamo Youngovim pokusom.**

*Napišimo naslov: Youngov pokus*

**Pokus 1:** Youngov pokus

Pribor: izvor svjetlosti (crveni laser), zaslon s dvije pukotine, zaslon za projiciranje (bijela ploča)

Tijek pokusa:

Laser usmjerimo prema bijeloj ploči, koja služi kao zastor za projiciranje. Između lasera i ploče stavimo zaslon s dvije uske paralelne pukotine.

(Komentar: Young je ovaj pokus izveo s bijelom svjetlosti, no mi ćemo radi jednostavnosti koristiti monokromatski izvor, tj. monokromatsku svjetlost.)

### **Što očekujete vidjeti na zaslonu kada uključimo laser?**

Učenici će vjerojatno koristiti znanje geometrijske optike i očekivati dvije točke ili dvije pruge.

Uključimo laser, na ploči je vidljiv uzorak koji zatim s učenicima komentiramo. Nakon što je pokus izveden, a na ploči je vidljiv uzorak, učenici opažaju, skiciraju uzorak samostalno u svoje bilježnice i uočavaju te komentiraju ključne karakteristike.



Slika 4.3: Uzorak dobiven interferencijom crvene svjetlosti kroz dvije pukotine [7]

Kako bismo učenicima pomogli u uočavanju ključnih karakteristika postavljamo im dodatna pitanja:

**Kakva je slika vidljiva na ploči? Što vidite?**

**Kakve su udaljenosti između susjednih svijetlih pruga koje vidite?**

**Što se nalazi između svijetlih pruga?**

Od učenika očekujemo da će uočiti crvene i tamne pruge, pri čemu su udaljenosti između pruga jednake. Koristeći znanje geometrijske optike učenici će za tamne pruge vjerojatno reći da do tih točaka svjetlost nije ni došla.

## 2) SREDIŠNJI DIO

### Istraživačko pitanje: Kako je nastala slika u Youngovom pokusu?

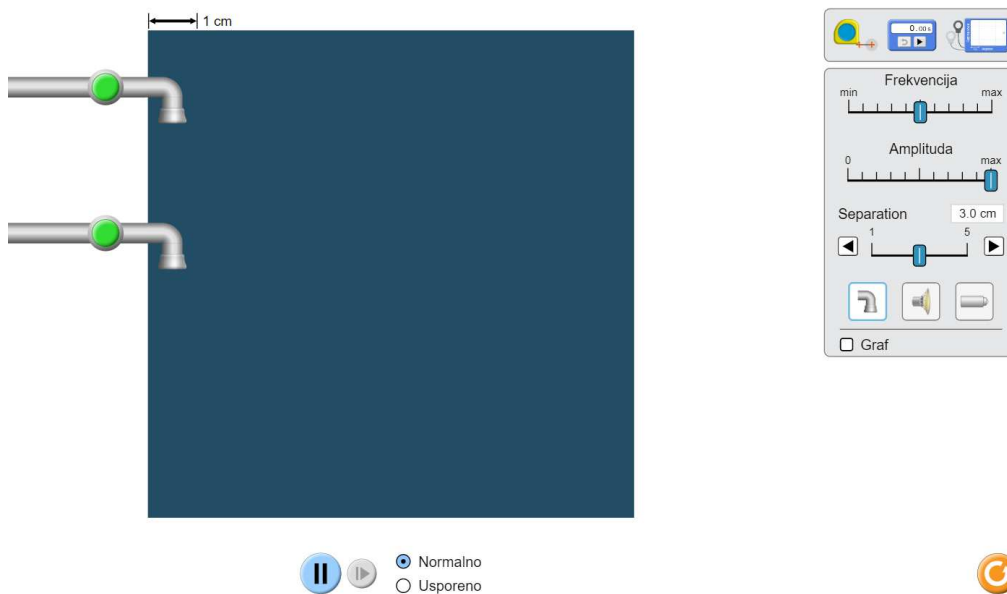
Ako je to interferencijska slika, morala bi nastati poput interferencije mehaničkih valova, pa idemo vidjeti možemo li to dvoje povezati.

### Pokus 2: Phet simulacija mehaničkih valova – frontalni istraživački pokus

Pribor: računalo i projektor, bijela ploča

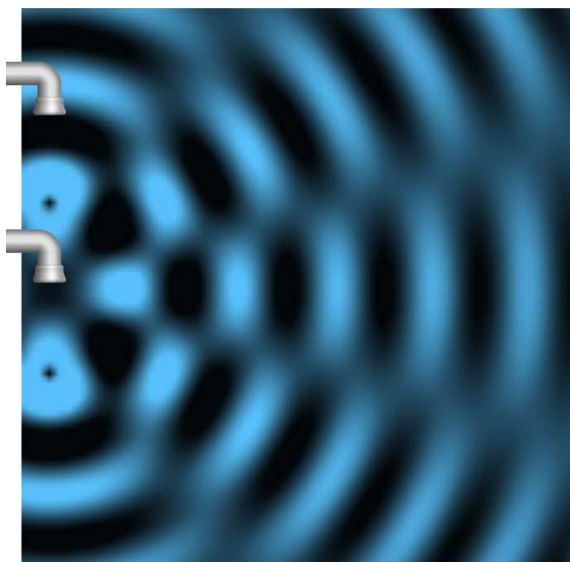
Tijek pokusa:

Uključimo Phet simulaciju s valovima na vodi. Uključimo jedan izvor da učenici uoče što predstavljaju plave, a što crne pruge. Zatim uključimo i drugi izvor, te s učenicima komentiramo nastalu situaciju. U simulaciji je moguće mijenjati frekvenciju, amplitudu i razmak između izvora. Moguće je i usporiti ili pauzirati simulaciju kako bi učenici lakše uočili, izmjerili razmak između valnih fronti.



Slika 4.4: Izgled simulacije valova na vodi [13]

**Opišite sliku koju vidite na ploči, što ona predstavlja?**



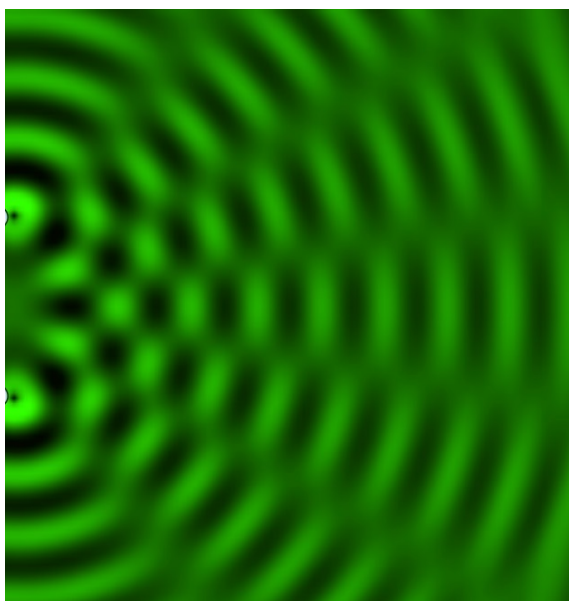
Slika 4.5: Interferencija valova na vodi u simulaciji [13]

Učenici se kroz raspravu prisjećaju značenja svijetlih i tamnih kružnica, tj. valnih fronti. Kroz promatranje simulacije učenici bi trebali uočiti područja pojačavanja i oslabljivanja valova, i prisjetiti se pojmova konstruktivne i destruktivne interferencije.

**Ako bi se radilo o svjetlosti, što bi u simulaciji odgovaralo pukotinama, što zaslonu i što bismo očekivali vidjeti na zaslonu?**

Učenici bi kroz diskusiju trebali doći do zaključka da bi izvori vode u ovom slučaju odgovarali izvorima svjetlosti, tj. pukotinama. Trebali bi kroz simulaciju uočiti da valovi na vodi udaraju u rub spremnika i tamo ostavljaju svoj otisak, uzorak, pa bi time trebali zaključiti da u slučaju valova na vodi rub spremnika predstavlja zaslon. U simulaciji bi trebali uočiti svijetle/tamne i zamućene pruge iz čega bi trebali zaključiti da će se na zaslonu pojaviti interferencijski uzorak.

Kroz raspravu bi učenici trebali zaključiti da je slika dobivena Youngovim pokusom analoga uzorku valova na vodi, dakle dobivena interferencijom svjetlosti.



Slika 4.6: Interferencija svjetlosnih valova kroz dvije pukotine u simulaciji [13]

Napomena:

**Zašto interferencijski uzorak svjetlosti ne vidimo svugdje oko sebe kad je uključeno više izvora svjetlosti?**

Koristeći dvije pukotine dobili smo dva koherentna izvora, jer su oba nastala od istog izvora.

*KOHERENTNI IZVORI – izvori svjetlosti jednakih valnih duljina i amplituda, i stalne razlike u fazi*

Za postizanje stalnog interferentnog uzorka moramo imati koherentne izvore, a nezavisni izvori to nisu.

(Svjetlost uvijek interferira, neovisno o izvorima, ali stalan interferencijski uzorak ne može se dobiti ako nemamo koherentne izvore.)

**ZAKLJUČAK:**

**Koji je model bolji i kako smo to pokazali?**

Učenici bi trebali zaključiti da smo Youngovim pokusom demonstrirali interferenciju svjetlosti (kao novu pojavu), čime smo pokazali da je valni model bolji.



### 3) ZAVRŠNI DIO

1. Svjetlost dviju LED-žarulja pada na isto područje zastora. Što će se vidjeti na zastoru?

- a) Interferencijski uzorak, jer su LED-žarulje koherentni izvori svjetlosti.
- b) Približno ravnomjerno, ali slabo osvijetljeno područje, jer su LED-žarulje nekoherentni izvori svjetlosti slabog intenziteta.
- c) Interferencijski uzorak, jer su LED-žarulje identične.
- d) Približno ravnomjerno, ali slabo osvijetljeno područje, jer su LED-žarulje koherentni izvori svjetlosti.

Učenici zaključuju da LED-žarulje (slabog intenziteta), kao ni obične žarulje ili bilo koja dva nezavisna izvora nisu koherentni izvori, zbog čega će područje biti približno ravnomjerno i slabo osvijetljeno.

2. Dva izvora valova udaljena su međusobno  $3\lambda$ , a svaki je od točke T sredstva udaljen  $15\lambda$ . Kolika je razlika putova valova iz ta dva izvora do točke T?

- a) Razlika putova je  $0\lambda$ .
- b) Razlika putova je  $3\lambda$ .
- c) Razlika putova je  $15\lambda$ .
- d) Razlika putova je  $12\lambda$ .

Učenici se prisjećaju rečenog na satu, da je razlika udaljenosti svakog od izvora svjetlosti do točke jednaka razlici putova i uočavaju da je ovdje razlika putova jednaka nuli.

3. Dva koherentna izvora svjetlosti koja su u fazi, S1 i S2, emitiraju valove valne duljine  $\lambda$  i amplitude  $2A$ . Valovi se susretnu u točki T u kojoj je razlika udaljenosti S1T i S2T,  $3\lambda$ . Koliko će iznositi amplituda rezultatnog vala u točki T?

- a) Nula, jer će se valovi potpuno poništiti.
- b)  $A$ , jer će se valovi djelomično poništiti.
- c)  $2A$ , jer oba vala imaju amplitudu  $A$ .
- d)  $4A$ , jer će se valovi pojačati.

Učenici zaključuju da će se amplitude dvaju valova zbrojiti prema načelu superpozicije, tj. konačna amplituda će biti dvostruko veća.

## 2. SAT: ISTRAŽIVANJE INTERFERENCIJSKOG UZORKA

### Obrazovni ishodi:

**FIZ SŠ C.4.1., FIZ SŠ D.4.1. Analizira valnu prirodu svjetlosti**

**FIZ SŠ C.4.9., FIZ SŠ D.4.9. Rješava fizičke probleme**

**FIZ SŠ C.4.10., FIZ SŠ D.4.10. Istražuje fizičke pojave**

- istražiti ovisnost razmaka između pruga o valnoj duljini svjetlosti
- istražiti ovisnost razmaka između pruga o udaljenosti izvora od zaslona
- istražiti ovisnost razmaka između pruga o razmaku između izvora
- matematički opisati ovisnost razmaka između pruga o valnoj duljini svjetlosti, udaljenosti izvora od zaslona i razmaku između izvora
- razvijati eksperimentalne vještine
- razvijati znanstveno zaključivanje (proporcionalno zaključivanje, osmišljanje pokusa, kontrola varijabli)
- razvijati usmeno, pismeno i grafičko izražavanje
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

### Ishodi međupredmetnih tema:

osr A.5.3. Razvija svoje potencijale.

osr B.5.2. Suradnički uči i radi u timu.

uku A.4/5.2. Primjena strategija učenja i rješavanje problema

uku A.4/5.4. Učenik samostalno kritički promišlja i vrednuje ideje.

uku C.4/5.3. Učenik iskazuje interes za različita područja, preuzima odgovornost za svoje učenje i ustraje u učenju.

uku D.4/5.1. Učenik stvara prikladno fizičko okruženje za učenje s ciljem poboljšanja koncentracije i motivacije.

uku D.4/5.2. Učenik ostvaruje dobru komunikaciju s drugima, uspješno surađuje u različitim situacijama i spreman je zatražiti i ponuditi pomoć.

pod A.5.1. Primjenjuje inovativna i kreativna rješenja.

pod B.5.2. Planira i upravlja aktivnostima.

## TIJEK NASTAVNOG SATA

## 1) UVODNI DIO

Na prijašnjem satu prisjetili smo se pojma interferencije mehaničkih valova, te smo izvođenjem Youngovog pokusa pokazali da je svjetlost val dobivanjem interferencijskog uzorka.

**Koja su glavna obilježja uzorka? Kako nastaju svijetle, a kako tamne pruge?**

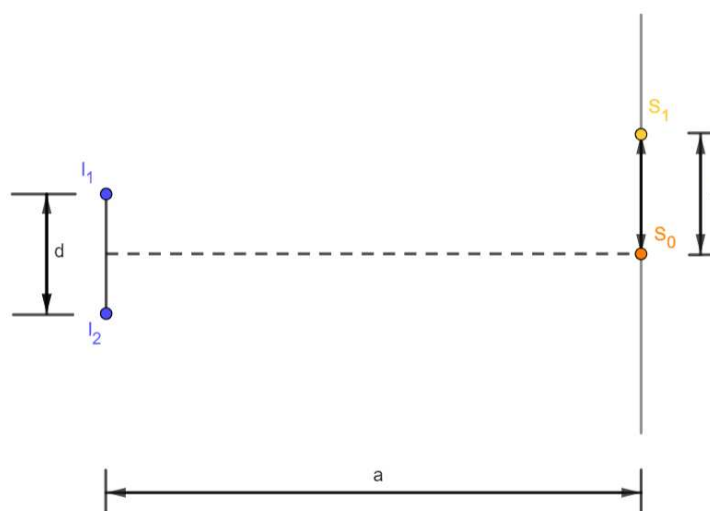
Učenici bi se trebali prisjetiti da je razmak između pruga jednak i sve svijetle pruge su približno jednakog intenziteta, te da i svijetle i tamne pruge nastaju zbrajanjem svjetlosnih valova. Svijetle pruge nastaju zbrajanjem valova u fazi, a tamne pruge zbrajanjem valova u protufazi (zbog čega se valovi „ponište“ i nastaje tamna pruga).

**Pokus 1:** Youngov pokus – opservacijski pokus

Pribor: izvor svjetlosti (crveni laser), zaslon s dvije pukotine, zaslon za projiciranje (bijela ploča)

Tijek pokusa:

Laser usmjerimo prema bijeloj ploči, koja služi kao zastor za projiciranje. Između lasera i ploče stavimo zaslon s dvije uske paralelne pukotine. Uključimo laser, a na ploči je vidljiv uzorak. Na ploči označimo mjesta na kojim se nalaze svijetle pruge, a na drugome mjestu na ploči napravimo geometrijsku skicu Youngovog pokusa i uvedemo sve veličine.



Slika 4.7: Geometrija Youngovog pokusa

$I_1, I_2$  – izvori (tj. pukotine)  
 $d$  – udaljenost između izvora (tj. dviju pukotina)  
 $a$  – udaljenost pukotina od zaslona  
 $S_0$  – središnja (nulta) svjetla pruga  
 $S_1$  – prva svjetla pruga  
 $s$  – udaljenost između susjednih svjetlih pruga

## 2) SREDIŠNJI DIO

### Što u Youngovom pokusu utječe na razmak između interferencijskih pruga?

Učenici daju svoje ideje o varijablama koje bi mogle utjecati.

*Napomena: širinu pukotina ne mijenjamo.*

### Istraživačko pitanje 1: Kako razmak među prugama ovisi o valnoj duljini svjetlosti?

*Prije izvođenja pokusa učenike upitamo na koji bi način oni istražili navedenu ovisnost, razmaka među pruga i valne duljine svjetlosti. Što bi mijenjali, a što držali stalnim?*

Slušamo njihove ideje i pretpostavke, a zatim izvedemo pokus.

### Pokus 2: Promjena valne duljine

Pribor: izvor svjetlosti 1 (crveni laser), izvor svjetlosti 2 (zeleni laser), zaslon s dvije pukotine, zaslon za projiciranje (bijela ploča), crveni marker, zeleni marker

Tijek pokusa:

Usmjerimo crveni laser kroz dvije pukotine. Na ploči dobijemo interferencijski uzorak s crvenim prugama. Crvenim markerom označimo mjesto središnje crvene pruge i četvrte lijeve pruge (kako bismo lakše mjerili).

Zatim na mjesto crvenog lasera stavimo zeleni laser i usmjerimo ga kroz pukotine. Na ploči dobijemo interferencijski uzorak sa zelenim prugama. Zelenim markerom označimo mjesto središnje zelene pruge i četvrte lijeve pruge (kako bismo lakše mjerili).

Nakon što je pokus izveden, na ploči označene pruge različitih boja od učenika očekujemo opažanja, skiciranje uzoraka različitih boja u bilježnice i zaključak.

Učenici bi trebali uočiti da se povećanjem valne duljine poveća i razmak između susjednih pruga.

**Te veličine su i proporcionalne. (Morali bismo mjeriti na više valnih duljina i mjeriti razmake da bismo iz pokusa mogli to zaključiti, no drugi su mjerili i veličine su proporcionalne.)**

*Učenike sada dijelim u 6 grupa.*

Tri grupe dobivaju zadatak A), istražuju kako  $s$  ovisi o  $a$ , tj. kako razmak između susjednih pruga ovisi o udaljenosti od zaslona. Tri grupe dobivaju zadatak B), istražuju kako  $s$  ovisi o  $d$ , tj. kako razmak između susjednih pruga ovisi o udaljenosti između izvora, pri čemu učenicima sa zadatkom B) dajemo barem tri različita dijapozitiva na kojima su pukotine različito udaljene.

**Istraživačko pitanje 2: Kako razmak između pruga ovisi o udaljenosti izvora od zaslona?**

LISTIĆ 1:

1. Koje veličine u pokusu držite stalnima?
2. Koje veličine u pokusu mijenjate?
3. Odaberite tri udaljenosti između izvora i zaslona i popunite tablicu, ( $s$  izmjerite ravnalom):

$a/m$	$s/mm$

4. Što možete uočiti iz mjerenja?
5. Kakav je odnos navedenih veličina?

Učenici bi ovim istraživanjem trebali zaključiti da su veličine  $s$  i  $a$  proporcionalne, tj. povećanjem udaljenosti izvora od zaslona povećava se i razmak između susjednih pruga i to proporcionalno, tako da im je omjer konstantan.

**Istraživačko pitanje 3: Kako razmak između pruga ovisi o razmaku između izvora?**

LISTIĆ 2:

1. Koje veličine u pokusu držite stalnima?
2. Koje veličine u pokusu mijenjate?
3. Odaberite tri razmaka među pukotinama i popunite tablicu, ( $s$  izmjerite na milimetarskom papiru na zaslonu):

$d/\mu m$	$s/mm$

4. Što možete uočiti iz mjerenja?
5. Kakav je odnos navedenih veličina?

Učenici bi ovim istraživanjem trebali zaključiti da su veličine  $s$  i  $d$  obrnuto proporcionalne, tj. povećanjem udaljenosti između izvora smanji se razmak između susjednih pruga i to tako da im je umnožak konstantan.

Rezultate svih grupa prikupimo i analiziramo frontalno te bismo iz mjerenja i zaključaka učenika trebali sistematizirati:

Listić 1:  $s \sim a$

Listić 2:  $s \sim \frac{1}{d}$

Zajednički:  $s \sim \lambda$

To nam daje konačni izraz:  $s = \frac{\lambda a}{d}$ .

Provjerimo izraz za barem jedan set mjernih podataka, da se uvjerimo da nije potrebna još neka dodatna konstanta proporcionalnosti.

**Kako možemo povećati razmak među prugama? Što zaključujete na temelju matematičkog izraza?**

Učenici bi zaključivanjem uz pomoć prethodnog izraza trebali zaključiti da će se razmak između pruga povećati ako povećamo valnu duljinu svjetlosti ili udaljenost izvora od zaslona ili ako smanjimo razmak između izvora.

### 3) ZAVRŠNI DIO

KONCEPTUALNA PITANJA (učenici odgovaraju pomoću kartica, odgovori se diskutiraju):

1. Povećamo li udaljenost između pukotina 4 puta u Youngovom pokusu, ne mijenjajući udaljenost zastora niti valnu duljinu svjetlosti što će se dogoditi s razmacima između interferencijskih pruga?

- a) povećat će se 4 puta
- b) povećat će se 2 puta
- c) smanjit će se 4 puta
- d) smanjit će se 2 puta

Učenici zaključuju da su  $s$  i  $d$  obrnuto proporcionalni, pa će se povećanjem udaljenosti među pukotinama četiri puta razmak pruga smanjiti isti broj puta.

2. Kroz dvije pukotine propuštamo redom svjetlost četiriju boja te promatramo sliku interferencije na zastoru ne mijenjajući razmak među pukotinama niti udaljenost zastora. Pri kojoj boji svjetlosti ćemo opaziti najveće razmake između svijetlih pruga interferencije?

- a) plavoj
- b) ljubičastoj
- c) crvenoj
- d) zelenoj

Učenici se prisjećaju koja boja ima najveću odnosno najmanju valnu duljinu, i zaključuju da najveću valnu duljinu ima crvena boja. Kako su valna duljina i razmak između pruga proporcionalne veličine, time će i razmak između pruga biti najveći za najveću valnu duljinu.

3. U Youngovom eksperimentu s dvije pukotine, koristite zeleno lasersko svjetlo i uočite da su susjedni maksimumi na ekranu preblizu da biste izmjerili razmak između njih. Koja bi od sljedećih promjena mogla povećati razmak između susjednih maksimuma na zaslonu?
- Povećanje razmaka između pukotina.
  - Približavanje zaslona pukotinama.
  - Smanjenje razmaka između pukotina.
  - Korištenje svjetla manje valne duljine.

Učenici zaključuju da je odgovor smanjenje razmaka između pukotina jer su  $s$  i  $a$ ,  $s$  i  $\lambda$  proporcionalne veličine, a  $s$  i  $d$  obrnuto proporcionalne.

4. Crveno lasersko svjetlo pada na dvije uske vertikalne paralelne pukotine. Zaslون je postavljen na jedan metar od pukotina. Ako zaslon postavimo na pet metara od pukotina, kakvu promjenu uzorka na ekranu možemo očekivati?
- Razmak između susjednih maksimuma bit će pet puta veći nego prije.
  - Razmak između susjednih maksimuma bit će pet puta manji nego prije.
  - Razmak između susjednih maksimuma bit će isti kao i prije.

Učenici zaključuju da je odgovor da će razmak između susjednih maksimuma biti pet puta veći nego prije jer su  $s$  i  $a$  proporcionalne veličine, dok ostale veličine držimo stalnima.



### 3. SAT: OPTIČKA REŠETKA – INTERFERENCIJA SVJETLOSTI

#### Obrazovni ishodi:

**FIZ SŠ C.4.1., FIZ SŠ D.4.1. Analizira valnu prirodu svjetlosti**

**FIZ SŠ C.4.9., FIZ SŠ D.4.9. Rješava fizičke probleme**

**FIZ SŠ C.4.10., FIZ SŠ D.4.10. Istražuje fizičke pojave**

- opisati interferenciju na optičkoj rešetki
- objasniti interferenciju na optičkoj rešetki
- matematički opisati interferenciju na optičkoj rešetki
- protumačiti konstantu rešetke
- kvalitativno zaključivati o promjenama varijabli
- razvijati znanstveno zaključivanje (osmišljanje pokusa, kontrola varijabli)
- razvijati usmeno, pismeno i grafičko izražavanje
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

#### Ishodi međupredmetnih tema:

osr A.5.3. Razvija svoje potencijale.

uku A.4/5.2. Primjena strategija učenja i rješavanje problema

uku A.4/5.4. Učenik samostalno kritički promišlja i vrednuje ideje.

uku C.4/5.3. Učenik iskazuje interes za različita područja, preuzima odgovornost za svoje učenje i ustraje u učenju.

uku D.4/5.1. Učenik stvara prikladno fizičko okruženje za učenje s ciljem poboljšanja koncentracije i motivacije.

pod A.5.1. Primjenjuje inovativna i kreativna rješenja.

pod B.5.2. Planira i upravlja aktivnostima.

### TIJEK NASTAVNOG SATA

#### 1) UVODNI DIO

**UVODNI PROBLEM:** U Youngovom pokusu smo osvjetljavali dvije pukotine, što ako ih osvjetlimo jako puno, kako će se uzorak promijeniti?

**U znanosti i tehnici često koristimo uređaj koji nazivamo optičkom rešetkom. Optička rešetka je pločica s nizom uskih paralelnih, jednakih i ekvidistantnih pukotina.**

**One se izrađuju urezivanjem finih, paralelnih i vrlo bliskih linija na podlogu od različitih neprozirnih materijala ili printanjem velikog broja linija na plastičnu foliju.**

**Veličina koja određuje svojstva i kakvoću rešetke je konstanta rešetke,  $d$ , (razmak između susjednih pukotina).**

**Pokus 1:** Optička rešetka – opservacijski pokus

Pribor: izvor svjetlosti (crveni laser), optička rešetka, zaslon za projiciranje (bijela ploča)

Tijek pokusa:

Laser usmjerimo prema bijeloj ploči, koja služi kao zastor za projiciranje. Između lasera i ploče stavimo optičku rešetku.

**Što očekujete vidjeti na zaslonu kada uključimo laser?**

Učenici će vjerojatno koristiti prije izveden Youngov pokus i očekivati svijetle i tamne pruge. Mnogi će očekivati da će pruge sada biti gušće, jer imamo više pukotina.

Uključimo laser, na ploči je vidljiv uzorak koji zatim s učenicima komentiramo.

Nakon što je pokus izveden, a na ploči je vidljiv uzorak, učenici opažaju, skiciraju uzorak samostalno u svoje bilježnice i uočavaju te komentiraju ključne karakteristike.



Slika 4.8: Uzorak dobiven interferencijom crvene svjetlosti na optičkoj rešetki [7]

**Na koji način je ovaj uzorak usporediv s uzorkom dobivenim Youngovim pokusom?**

Učenici bi kroz raspravu trebali zaključiti da su u Youngovom pokusu interferirala samo dva vala, dok u slučaju optičke rešetke interferira puno valova zbog čega dobivamo svijetle pruge jačeg intenziteta i šireg međusobnog razmaka.

## 2) SREDIŠNJI DIO

**Istraživačko pitanje 1: Kako bi se uzorak promijenio da promijenimo konstantu rešetke ili udaljenost od zastora?**

*Prije izvođenja pokusa učenike upitamo na koji bi način oni istražili navedenu ovisnost, što bi mijenjali, a što držali stalnim?*

Učenici bi trebali zaključiti da će stalna biti valna duljina, a zanima ih ponovo kako će promjena udaljenosti i broja pukotina utjecati na razmak između pruga na interferencijskom uzorku.

*Dijelim razred u 4 grupe.*

Dvije grupe će istraživati kvalitativno ovisnost  $s$  o  $a$ , dvije grupe će istraživati kvalitativno ovisnost  $s$  o  $d$ .

**Istraživačko pitanje 2: Kako razmak između pruga ovisi o udaljenosti izvora od zaslona?**

## LISTIĆ 1:

1. Koje veličine u pokusu držite stalnima?
2. Koje veličine u pokusu mijenjate?
3. Odaberite tri udaljenosti između izvora i zaslona i popunite tablicu, ( $s$  izmjerite ravnalom):

$a/m$	$s/mm$

4. Što možete uočiti iz mjerenja?

Učenici zaključuju da razmak maksimuma raste s porastom udaljenosti zastora.

**Istraživačko pitanje 3: Kako razmak između pruga ovisi o konstanti optičke rešetke?**

## LISTIĆ 2:

1. Koje veličine u pokusu držite stalnima?
2. Koje veličine u pokusu mijenjate?
3. Odaberite tri različite optičke rešetke i popunite tablicu, ( $s$  izmjerite na mm papiru na zaslonu, a  $d$  izračunajte na način  $d = \frac{1 \text{ mm}}{\text{broj zareza}}$ , pri čemu je broj zareza po milimetru napisan na svakoj optičkoj rešetki):

$d/m$	$s/mm$

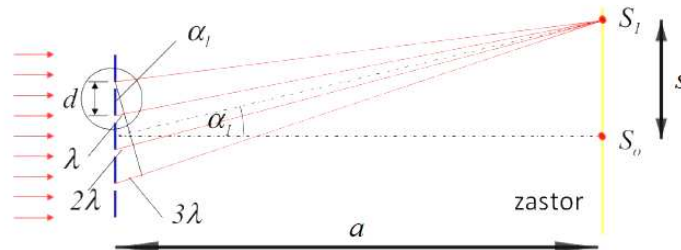
4. Što možete uočiti iz mjerenja?

Učenici zaključuju da razmak maksimuma opada s povećanjem konstante rešetke.

**Interaktivni izvod**

Na ploču crtam geometriju optičke rešetke i zaslona i uključujem učenike u definiranje opis veličina na slici.

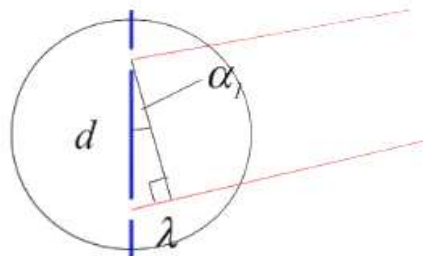
Prva slika koju skiciram prikazuje optičku rešetku s prikazana četiri zarez, pri čemu je definiran razmak između zarez, središte zaslona i prvi interferencijski maksimum.  $d$  je u ovom slučaju razmak između dva susjedna zarez,  $a$  udaljenost izvora od zaslona,  $s$  razmak između središnjeg maksimuma i maksimuma prvog reda.



Slika 4.9: Geometrija interferencije monokromatske svjetlosti na optičkoj rešetki

Na slici 4.9 je vidljivo da paralelni snop zraka monokromatske (crvene) svjetlosti upada na optičku rešetku, iz koje možemo dobiti uvjete interferencije. Definiran je kut  $\alpha_1$  pod kojim se vidi maksimum prvog reda. Uvećana slika..., prikazuje susjedne pukotine s razmakom  $d$ , dvije paralelne zrake, i već navedeni kut. Da bismo dobili maksimum u  $S_1$ , potrebno je da razlika putova iz susjednih pukotina bude jednaka cjelobrojnom višekratniku valne duljine, što se uočava na slici. Iz uvećane slike 4.10 lako možemo iščitati sinus kuta kao:

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d} \quad (4.1)$$



Slika 4.10: Uvećani dio geometrije interferencije monokromatske svjetlosti na optičkoj rešetki

Vraćajući se na cjelokupnu sliku pojave interferencije svjetlosti na optičkoj rešetki mogli bismo uočiti da vrijedi:

$$\sin \alpha_2 = \frac{2\lambda}{d}. \quad (4.2)$$

Iz čega možemo zaključiti da će za maksimum  $k$ -tog reda vrijediti:

$$\sin \alpha_k = \frac{\lambda k}{d}, \text{ tj.} \quad (4.3)$$

$$d \sin \alpha_k = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Nakon izvoda i dobivene nove relacije upitamo učenike kako bi protumačili dobivenu relaciju.

Od učenika očekujemo razumijevanje relacije, pri čemu bi trebali zaključiti da se interferencijske pruge udaljenije od središta vide pod većim kutom, da se  $k$ -ta interferencijska pruga vidi pod većim kutom za veću valnu duljinu, a povećavanjem razmaka između zareza smanjuje se kut pod kojim se vidi  $k$ -ta interferencijska pruga.

### 3) ZAVRŠNI DIO

#### Aplikacijski pokus: Optička rešetka – bijela svjetlost

Pribor: izvor bijele svjetlosti (žaruljica ili svjetiljka mobitela), optička rešetka

*Prije izvođenja pokusa upitam učenike što očekuju vidjeti izvođenjem pokusa.*

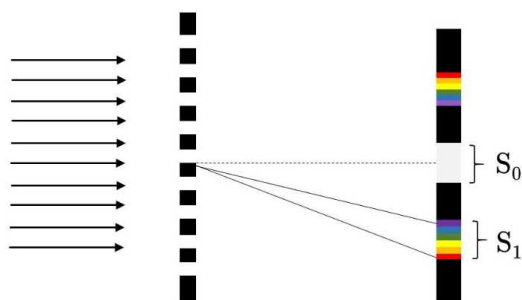
Učenici koriste znanje o optičkoj rešetki da predvide da će se svaka valna duljina (boja) vidjeti pod drugim kutom). Neki možda očekuju ponovno vidjeti svijetle, ali bijele pruge, budući da je u pitanju bijela svjetlost i tamne pruge. Nakon što učenici iznesu svoje ideje, izvedemo pokus.

Tijek pokusa:

Učenike ponovno podijelim u nekoliko grupa. Svakoj grupi dadem jednu optičku rešetku i upućujem ih u zadatak. A zadatak je svakog od učenika iz grupe kroz optičku rešetku pogledati u izvor svjetlosti.

Nakon što su svi učenici pogledali kroz dane im optičke rešetke upitam ih što opažaju i kako tumače raspored boja.

Od učenika očekujem da će opaziti interferencijske pruge, slika 4.11, u kojima je došlo do razlaganja bijele svjetlosti na spektar boja, dok se u središtu nalazi centralni bijeli maksimum. Trebali bi uočiti da je u svakoj interferencijskoj prugi, promatrajući od središta zaslona prema van, ljubičasta boja prva (jer ima najmanju valnu duljinu od svih boja), a crvena boja zadnja (jer ima najveću valnu duljinu od svih boja).



Slika 4.11: Interferencija bijele svjetlosti na optičkoj rešetki [12]

#### ZAKLJUČAK:

**Na koji način se uzorak promijenio kada smo monokromatsku svjetlost pustili kroz optičku rešetku, a što se dogodilo kada smo kroz optičku rešetku pustili bijelu svjetlost?**

Učenici bi trebali zaključiti da u slučaju optičke rešetke interferira puno valova zbog čega dobivamo svijetle pruge jačeg intenziteta i šireg međusobnog razmaka. Dok je pri propuštanju bijele svjetlosti kroz optičku rešetku, osim interferencije, došlo i do razlaganja bijele svjetlosti na boje.

#### KONCEPTUALNA PITANJA

1. Konstanta optičke rešetke je dva puta veća od valne duljine monokromatske svjetlosti koja na nju upada okomito. Sinus kuta pod kojim se vidi prvi maksimum na zastoru je:
  - a) 0.5
  - b) 0.3
  - c)  $30^\circ$
  - d)  $50^\circ$

Učenici bi se trebali prisjetiti formule koju smo izveli, uočiti da se traži sinus kuta zbog čega odgovor neće biti u stupnjevima.

## Poglavlje 5

### Zaključak

Učenicima srednje škole, a i studentima prvih godina fakulteta, valna optika je teška nastavna cjelina. Provedenim istraživanjima pokazano je da učenici imaju brojne poteškoće u razumijevanju osnovnih koncepata valne optike i poteškoće u shvaćanju interferencije svjetlosti. Kako bi se razvilo učeničko konceptualno znanje i razumijevanje potrebno je promijeniti način poučavanja iz tradicionalnog predavačkog u učinkovitiju istraživački usmjerenu nastavu. Nastavnici bi trebali težiti k tome da nastava bude istraživački usmjerena, ali uz to trebali bi biti svjesni ograničenosti vremenom i opremom. Učeničke istraživačke pokuse nije potrebno izvoditi na svakome satu, ali povremeno izvođenje učeničkih pokusa može pridonijeti njihovom boljem poznavanju i razumijevanju pojava, koncepata i znanstvenih procesa. Istraživački usmjerena nastava uključuje i snimljene pokuse, simulacije, konceptualna pitanja i raspravu, a ne samo izvođenje pokusa. Pokusi vode boljem razumijevanju fizičkih pojava, a raspravom nakon pokusa mogu se lakše uočiti učenički pogrešni modeli i razvijati njihove komunikacijske vještine. Istraživanja učeničkih pogrešnih modela, pogrešnih shvaćanja i poteškoća mogu pomoći nastavnicima fizike da bolje razumiju učeničke poteškoće i tome prilagode nastavu. U gradivu valne optike poseban bi se naglasak trebao staviti na izvođenje pokusa kako bi učenici imali priliku upoznati se s novim pojavama, istražiti ih i formulirati kvalitetna stručna objašnjenja. Suština istraživački usmjerene nastave je da su učenici aktivni i intelektualno angažirani formulirajući i testirajući hipoteze i donoseći zaključke koje mogu argumentirati.

Cilj ovog diplomskog rada bio je predstaviti nastavnu sekvencu istraživački usmjerenog poučavanja interferencije svjetlosti u srednjoškolskoj nastavi fizike. Nastavna sekvenca uključuje učeničke pokuse, istraživačke pokuse, konceptualna pitanja i rasprave kako bi se učenicima olakšalo razumijevanje pojave interferencije svjetlosti i povezivanje koncepata i zakonitosti iz različitih znanstvenih područja.



# Bibliografija

- [1] *Predavanja iz kolegija Metodika nastave fizike I*, doc. dr. sc. Maja Planinić, Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u zagrebu, <http://metodika.phy.hr/claroline/claroline/course/index.php?cid=MET1N>
- [2] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, *Kurikulum nastavnog predmeta fizika za osnovne škole i gimnazije*, [https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_01\\_10\\_210.html](https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html), (veljača 2022.)
- [3] B.S. Ambrose, L. C. McDermott, P.S. Shaffer, R.N. Steinberg, *An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference*, Am. J. Phys. 67, 146 (1999).
- [4] A. Coetsee, S.N. Imenda, *Alternative conceptions held by first year physics students at a South African university of technology concerning interference and diffraction of waves*, Res. High. Educ. J. 16, 1 (2012).
- [5] K. Wosilait, P. R. Heron, P. S. Shaffer, L. C. McDermott, *Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light*, Am. J. Phys. 67, S5 (1999).
- [6] K. Matejak Cveniće, L. Ivanjek, M. Planinić, K. Jelićić, A. Sušac, *Demonstracijski intervjui iz valne optike.*, Zbornik radova. XIV. hrvatski simpozij o nastavi fizike (str. 98 -104). Zadar, Hrvatsko fizikalno društvo, (2019) (ur. K. Jelićić, K. Matejak Cveniće, P. Pećina, M. Planinić).
- [7] K. Matejak Cveniće, M. Planinić, A. Sušac, L. Ivanjek, K. Jelićić, M. Hopf, *Development and validation of the Conceptual Survey on Wave Optics*, Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 18. 010103 (2022)
- [8] A. Susac, M. Planinic, A. Bubic, L. Ivanjek, and . Palmovic, *Student recognition of interference and diffraction patterns: An eye-tracking study* (2020)

- [9] Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 16, 020133D. Horvat, D. Hrupec, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazija*, Element, Zagreb, 2021.
- [10] J. Labor, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred srednjih strukovnih škola s četverogodišnjim programom fizike*, Alfa, Zagreb, 2019.
- [11] A. Hrlec, V. Paar, M. Sambolek, K. Vadjla Rešetar, *Fizika oko nas 4, udžbenik iz fizike u četvrtom razredu gimnazije*, Školska knjiga, Zagreb, 2021.
- [12] Euditorij, <https://euditorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/euditorij/api/proxy-guest/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/interferencija-svjetlosti.html> [15. srpnja 2022.]
- [13] Phet simulacije, [https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_hr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_hr.html) [10. kolovoza 2022.]
- [14] oPhysics, <https://ophysics.com/w2.html> [7. rujna 2022.]
- [15] Povijest fizike, [https://ahyco.uniri.hr/povijestfizike/19\\_optika.htm](https://ahyco.uniri.hr/povijestfizike/19_optika.htm) [20. srpnja 2022.]
- [16] Science photo library <https://www.sciencephoto.com/media/97816/view/circular-wave-systems> [9. rujna 2022.]

# Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada bio je ukazati na poteškoće u valnoj optici vezane uz interferenciju svjetlosti, koje su identificirane među hrvatskim gimnazijalcima, kao i srednjoškolskim učenicima i studentima u drugim zemljama. Provedena istraživanja pokazuju koliko je valna optika učenicima i studentima zahtjevna i teška. Dobro razumijevanje pojava interferencije mehaničkih ili svjetlosnih valova, izgleda da se teško razvija uobičajenim predavačkim načinom poučavanja fizike. Kako bi se osiguralo bolje razumijevanje pojave interferencije bitno je promijeniti način poučavanja iz predavačkog u istraživački usmjerenu nastavu. U radu je predstavljena istraživačka nastavna sekvenca kojom bi učenici trebali bolje upoznati i shvatiti pojavu interferencije svjetlosti, a uključuje frontalne i učeničke opservacijske, istraživačke i aplikacijske pokuse, konceptualna pitanja, matematičke opise pojava i raspravu. Istraživački usmjerenom nastavom učenici postaju aktivni u procesu učenja i na taj način očekujemo da bi lakše svladali pojavu interferencije svjetlosti.

# Summary

The goal of this diploma thesis was to point to student difficulties related to the interference of light that were identified on Croatian gymnasium students, as well as on secondary and university students in other countries. The conducted studies show that wave optics is a demanding and difficult topic for students. Good understanding of the interference of mechanical or light waves seems to be hard to develop through the usual lecture-based physics teaching. To achieve better understanding of the interference phenomenon it is important to switch from lecture-based to inquiry-based teaching. In this thesis an inquiry-based teaching sequence is presented through which students should better familiarize themselves with and understand the phenomenon of interference of light and includes frontal and students' observational, investigative and application experiments, conceptual questions, mathematical descriptions of phenomena and discussion. Through inquiry-based teaching students become active in the learning process and it is expected that in this way they could master more easily the phenomenon of interference of light.

# Životopis

Rođena sam 3. ožujka 1997. godine u Varaždinu. Osnovnu školu pohađala sam u Druškovcu, a obrazovanje sam nastavila u općoj gimnaziji Srednje škole Ivanec. Nakon završetka gimnazije, 2015. godine, upisujem Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Matematika i fizika; smjer: nastavnički, na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu.