

# Učenički istraživački pokusi u valnoj optici

---

Šarić, Mateja

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:217:191233>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Mateja Šarić

UČENIČKI ISTRAŽIVAČKI POKUSI U VALNOJ  
OPTICI

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Mateja Šarić**

Diplomski rad

**Učenički istraživački pokusi u valnoj  
optici**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc, Maja Planinić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2023.

*Zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc Maji Planinić na strpljivom vođenju kroz izradu diplomskog rada i asisitentici mag. educ. phys. et inf. Karolini Matejak CveniĆ na pomoći pri izvođenju pokusa.*

## Sažetak

Valna optika, kao vrlo zahtjevna nastavna cjelina u srednjoj školi, traži pristup poučavanju preko eksperimenata, kroz istraživački usmjerenu nastavu fizike. Istraživanja provedena u sklopu HRZZ projekta IP-2018-01-9085 INVESTIGATE pokazala su da hrvatski srednjoškolci imaju velikih poteškoća u razumijevanju koncepata valne optike te da bi uključivanje više učeničkih istraživačkih pokusa u nastavu valne optike moglo pomoći razvijanju njihovog boljeg konceptualnog razumijevanja, ali i znanstvenog zaključivanja. U ovom radu ćemo se upoznati s radom i dosadašnjim rezultatima projekta INVESTIGATE, te novom eksperimentalnom opremom za pokuse iz valne optike, koja je nabavljena u okviru projekta. Istražit ćemo koje bi se sve istraživačke učeničke pokuse moglo pomoću te opreme osmisliti, provesti i uklopiti u redovnu istraživački usmjerenu nastavu fizike. Također ćemo dati pregled najčešćih učeničkih poteškoća vezanih uz valnu optiku na temelju literature i rezultata projekta INVESTIGATE.

Ključne riječi: istraživački usmjerena nastava, valna optika, poteškoće u razumijevanju valne optike, učenički istraživački pokusi iz valne optike

# Students' investigative experiments in wave optics

## Abstract

Wave optics, as a very demanding teaching unit in high school, requires an approach to teaching through experiments, through inquiry-based teaching of physics. Research conducted as part of HRZZ project IP-2018-01-9085 INVESTIGATE showed that Croatian high school students have large difficulties with understanding the concepts of wave optics and that the inclusion of more student investigative experiments in the teaching of wave optics could help develop their conceptual understanding, but also scientific reasoning. In this paper, we will get acquainted with the work and results of the INVESTIGATE project so far, as well as the new experimental equipment for wave optics experiments, which was acquired as part of the project. We will explore what all research student experiments could be with the help of this equipment, design and implement them into the regular inquiry-based teaching of physics. We will also give an overview of the most common student difficulties related to wave optics based on the literature and results of the INVESTIGATE project.

Keywords: inquiry-based teaching, wave optics, difficulties in understanding wave optics, student investigative experiments in wave optics

# Sadržaj

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Istraživački usmjerena nastava i važnost pokusa</b>                             | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>Položaj valne optike u kurikulumu</b>   | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Valna optika i učeničke i studentske poteškoće u razumijevanju valne optike</b> | <b>6</b>  |
| 4.1      | Interferencija svjetlosti na dvjema pukotinama – Youngov pokus . . . . .           | 10        |
| 4.2      | Optička rešetka . . . . .  | 12        |
| 4.3      | Ogib svjetlosti na pukotini . . . . .  | 14        |
| 4.4      | Polarizacija svjetlosti . . . . .  | 17        |
| 4.5      | Poteškoće u razumijevanju valne optike . . . . .                                   | 17        |
| 4.6      | Rezultati intervjua s hrvatskim srednjoškolicima . . . . .                         | 21        |
| 4.7      | Učeničke poteškoće s polarizacijom svjetlosti . . . . .                            | 25        |
| <b>5</b> | <b>Oprema i aparatura potrebna za izvođenje pokusa iz valne optike</b>             | <b>28</b> |
| <b>6</b> | <b>Učenički istraživački pokusi iz valne optike</b>                                | <b>31</b> |
| 6.1      | Interferencija na dvije pukotine (Youngov pokus) - istraživački pokus .            | 31        |
| 6.2      | Interferencija na optičkoj rešetki - istraživački pokus . . . . .                  | 40        |
| 6.3      | Ogib na pukotini - istraživački pokus . . . . .                                    | 47        |
| 6.4      | Polarizacija . . . . .   | 49        |
| 6.5      | Polarizacija reflektirane svjetlosti - istraživački pokus . . . . .                | 52        |
| <b>7</b> | <b>Zaključak</b>   | <b>56</b> |
|          | <b>Literatura</b>  | <b>58</b> |



# 1 Uvod

Tema ovog diplomskog rada motivirana je nedavnim stupanjem na snagu novog kurikulumu u hrvatske škole. Cilj kurikulumu je promijeniti način održavanja nastave, kako u ostalim nastavnim predmetima, tako i u nastavi fizike. U nastavi fizike se želi prijeći na istraživački usmjerenu nastavu. Takva nastava podrazumijeva izvođenje pokusa i uključivanje učenika u interakciju kroz istraživački pristup nastavnim sadržajima fizike, koji uključuje opažanje pojava, formiranje hipoteza, predviđanja, provođenje eksperimenata i konačno analizu rezultata i formiranje zaključaka te matematičkog opisa pojave. Kroz istraživački pristup učenike se potiče da razvijaju kritičko mišljenje i znanstveno zaključivanje. Nastavno gradivo se učenicima prezentira kao relevantno i blisko, a stečeno znanje kao korisno u svakodnevnom životu. Mnogo je takvih nastavnih cjelina u fizici gdje je istraživački pristup primjenjiv, gdje učenici, vođeni uputama svojih nastavnika, istražuju pojave, vrše mjerenja i donose zaključke. Jedna od takvih nastavnih jedinica je i valna optika. Upravo u tu svrhu, da se pridonese uvođenju istraživački usmjerene nastave u hrvatske škole, proveden je projekt IP-2018-01-9085 (INVESTIGATE) pod nazivom „Utjecaj uključivanja istraživačkih učeničkih pokusa u srednjoškolsku nastavu fizike na razvoj znanstvenog zaključivanja i konceptualnog razumijevanja“. Projekt financira Hrvatska zaklada za znanost, voditeljica je doc. dr. sc. Maja Planinić s PMF-a u Zagrebu, a provodi ga Grupa za edukacijsku fiziku s Fizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu sa suradnicima [1].

U okviru projekta, istraživačka grupa je pripremila nastavnu sekvencu valne optike za osam nastavnih sati. Nabavljena je eksperimentalna oprema za pokuse i razvijeni su pripadni nastavni materijali. Održana je trodnevna edukacija za nastavnike koji su sudjelovali, gdje su bili detaljno upoznati s istraživačkim nastavnim pristupom, učeničkim i nastavničkim pokusima te nastavnim materijalima vezanima uz temu valne optike u srednjoj školi. Nakon uvodnog predavanja radilo bi se svaki dan u malim skupinama, a svaki je dan završavao zajedničkom diskusijom obrađenog. Sudionici su dobili sve potrebne nastavne materijale da tu nastavnu sekvencu mogu kasnije provesti sa svojim učenicima [1].

Ovaj diplomski rad će dati pregled rada projekta INVESTIGATE. Dat će pregled najčešćih učeničkih poteškoća vezanih uz valnu optiku na temelju literature i rezultata projekta i nove eksperimentalne opreme za pokuse iz valne optike koja je na-

bavljena u okviru projekta te će pokazati istraživačke učeničke pokuse koji se mogu provesti pomoću te opreme i koji se mogu uklopiti u redovnu istraživački usmjerenu nastavu fizike.

## **2 Istraživački usmjerena nastava i važnost pokusa**

Fizika je jedan od školskih predmeta koji dopušta, štoviše, čezne za korištenjem mnogih načina pristupanja gradivu i nudi na izbor razna pomagala kako bi se znanje u većoj mjeri, s manje napora i na zanimljive načine prenijelo na učenike. Istraživački usmjerena nastava, kao što je ranije objašnjeno, je nastava u kojoj se dio nastavnih sadržaja odrađuje kroz vođena učenička istraživanja. Obično se na spomen riječi 'nastava' pomisli na oblik nastave gdje nastavnik govori, a učenici slušaju i vode bilješke. U takvom obliku nastave učenici dobivaju odgovore na pitanja koja nikad nisu bila postavljena. Bilo bi mnogo bolje da se u nastavnom procesu pokušava doći do odgovora na pitanja koja bi učenici zaista sami postavili. Prije nego li se postavi pitanje mora postojati interes. Interes se kod učenika mora izazvati na početku sata jer kao i u svemu, početak je ključan. U nastavi fizike se vrlo često taj interes postiže uvodnim problemom i opservacijskim pokusom.

Školski sat se dijeli na uvodni, središnji i završni dio. Uvodni dio sata služi za izazivanje interesa i pažnje kod učenika i sustavno opažanje nove pojave. Ovisno o nastavnoj jedinici koja se obrađuje, sat se može započeti na različite načine. Najčešće se započinje uvodnim pitanjem za promišljanje (uvodnim problemom), kratkom pričom, anegdotom (stavljanjem učenika u povijesni kontekst problema) i opservacijskim pokusom (on je neizostavni dio uvodnog dijela sata). Pokus koji se izvodi u uvodnom dijelu sata izvodi se frontalno, što znači da se izvodi ispred razreda. Ponekad, ako manjak opreme ne dopušta, umjesto pokusa se može pokazati snimka pokusa ili pripadna simulacija. Takvim se pokusom demonstrira neka, za učenike, nova pojava i takav se pokus zbog toga zove opservacijski. Opservacijski pokus zauzima najveći dio uvodnog dijela sata. Njegova funkcija je da učenici sistematično i pažljivo opaze novu pojavu, stoga je važno pokus izvesti više puta i usmjeriti pažnju učenika na njegove ključne aspekte te usuglasiti opažanja. Nije uvijek nužno tražiti predviđanja učenika prije opservacijskog pokusa - ukoliko im je pojava posve nova i nemaju na temelju čega dati predviđanja može ih se samo usmjeriti da promotre pokus. No, izuzetno

je važno tražiti od učenika da iznesu svoja opažanja, koja se diskutiraju u razredu, a poslije ih samostalno zapišu i skiciraju pokus [4]. Na kraju uvodnog dijela sata se na ploču stavlja naslov koji najčešće bude naziv nove pojave koju su učenici kroz uvodni pokus upoznali.

Nakon uvodnog dijela sata slijedi središnji dio u kojem se postavlja istraživačko pitanje. Nakon toga se osmišljavaju istraživački pokusi kojima bi se moglo na to pitanje odgovoriti. Važno je prodiskutirati s učenicima kako bi mogli osmisliti prikladni pokus, što bi mijenjali, što mjerili, što držali konstantnim. To sve razvija njihovo znanstveno zaključivanje i uključuje ih aktivnije u nastavni proces [4]. Pokusi koji se izvode u središnjem dijelu sata mogu biti frontalni ili učenički, ovisno o mogućnostima. Bez obzira na mogućnosti, važno je uključiti sve učenike u istraživački proces. Za razliku od opservacijskog pokusa, u kojem pretpostavka ne mora biti nužna, u istraživačkom pokusu je vrlo često nužna. I upravo će se istraživačkim pokusom provjeriti njezina ispravnost. Učenicima se uz pokus može dati nastavni listić koji sadrži pitanja koja će voditi učenike kroz istraživački proces. Uz listić, važno je da nastavnik pruži dovoljno vodstva svojim učenicima, i pomoći ako je potrebno, uzimajući u obzir da što više toga pokušaju odraditi samostalno. To se može, naravno, postići dodatnim potpitanjima. Na kraju istraživanja formirat će se matematički model nove pojave i analizirati o čemu on govori [4].

Završni dio sata najčešće služi da se provjeri jesu li učenici razumjeli i usvojili nova znanja. To se najbrže može napraviti konceptualnim pitanjima s karticama. Osim toga, u završnom dijelu se može dati odgovor na uvodni problem, ako je on postojao.

Fizika je eksperimentalna znanost i bilo bi nezamislivo da postoji kao predmet u školi, a da se na nastavi ne izvode pokusi. Izvođenje pokusa u nastavi fizike je za učenike izuzetno korisno. Pri izvođenju pokusa učenici dobivaju direktno iskustvo, direktno opažaju pojavu na konkretnom primjeru. Taj primjer u pokusu za nastavnika postaje ishodište u poučavanju, a za učenike postaje ishodište u razvijanju novog znanja. Nepotrebno je reći da izvođenje pokusa nastavu čini zanimljivom, ne samo zato što je nastava ispunjena vizualnim sadržajima koji duže ostaju u sjećanju, nego zato što je izvođenje pokusa dobar način za uspostavu interakcije sa svim učenicima. Bez obzira na vrlo jasnu korisnost pokusa u nastavi, u velikom broju škola oni su slabo zastupljeni. Najčešći razlog male zastupljenosti pokusa u nastavi je manjak

opreme. Neke škole nemaju kabinet u kojem bi se potencijalna oprema mogla držati. Ovaj problem bi se mogao riješiti korištenjem simulacija na računalu, kojih se na internetu može naći u velikom broju ili pak snimkom pokusa. Osim ovog razloga postoje još neki koji su manje opravdani. Može se reći da priprema pokusa i cijelog procesa da se postavi oprema iziskuje previše vremena i truda, a na kraju se može dogoditi da pokus ne uspije. Takav se slučaj svakako može dogoditi, ali bez obzira na trajanje pripreme, isplati se. Čak i da pokus ne uspije, pogotovo nakon toliko truda, i takav slučaj može biti dobra prilika da se učenike nauči da se ponekad u životu, bez obzira na trud i uloženo vrijeme, dogode druge poteškoće koje su van njihove kontrole, koje će dati nepovoljan krajnji rezultat. Jedan od najvećih problema povezanih za premalu zastupljenost pokusa u nastavi fizike je što se i danas, bez obzira što je ustanovljeno da je istraživački usmjerena nastava pogodnija i učinkovitija, mnogo nastavnika odlučuje na inzistiranje na rješavanju numeričkih zadataka umjesto na izvođenje bilo kakvog pokusa.

U istraživački usmjerenoj nastavi najvažniji su istraživački pokusi, pogotovo ako te pokuse mogu izvoditi učenici. Naravno da je potrebno imati toliko setova opreme da učenici mogu sami izvoditi pokuse u manjim grupama od tri ili četiri učenika, no ako opreme nema u dovoljno velikom broju ili ako je nema uopće, mogu se naći alternativna rješenja da bar u nekoj mjeri učenici osjete duh istraživački usmjerene nastave. Djelomični nedostatak opreme može se riješiti da se istraživački pokus izvodi frontalno. Učenici se mogu podijeliti u grupe tako da svaka grupa odradi dio pokusa ili da svaka grupa bude zadužena za provjeru jedne hipoteze ili slično. Potpuni nedostatak opreme se može donekle ublažiti uporabom simulacija ili snimki pokusa.

### 3 Položaj valne optike u kurikulumu

Valna optika se obrađuje u četvrtim razredima gimnazija i tehničkih škola, tijekom 10-12 nastavnih sati, po 2 ili 3 sata tjedno, ovisno o školi. Za model  $4 \times 2$ , odnosno dva sata nastave fizike tjedno, kao i za model  $4 \times 3$ , odnosno tri sata nastave fizike tjedno, kurikulum nastave fizike u okviru valne optike predviđa sljedeće sadržaje: interferencija svjetlosti, koherentnost izvora svjetlosti, ogib svjetlosti, optička rešetka, polarizacija svjetlosti (izborna) [2]. Odgojno-obrazovni ishodi su također isti u oba modela, no preporuke za njihovo ostvarivanje su ponešto različite. Prva preporuka za izvođenje odgojno-obrazovnih ishoda u modelu  $4 \times 2$  je: "Potrebno je poznavati i uzeti u obzir učenikove postojeće ideje i znanja jer će oni izravno utjecati na kvalitetu i točnost njegovih mentalnih modela koji će se formirati u tom procesu." [2] Učenici ne ulaze u nastavni proces kao *tabula rasa*, nego imaju određene ideje od ranije. Te ideje mogu biti ispravne, premda mogu biti djelomično ispravne ili potpuno pogrešne. Učeničke, kao i studentske poteškoće, će se pomnije razmatrati u sljedećem poglavlju. S druge strane, prva preporuka za izvođenje odgojno-obrazovnih ishoda u modelu  $4 \times 3$  glasi: "Pokusi, rasprava i zaključak trebaju činiti najveći dio nastavnog procesa kao način upoznavanja i istraživanja fizičkih pojava. Izvode se tako da potiču učenikovu intelektualnu aktivnost, razvijajući eksperimentalne vještine, tražeći što više samostalnosti u pretpostavljanju, opažanju, opisivanju, zaključivanju i analizi rezultata." [2] Prve preporuke u ova dva modela su jako različite, premda je važno uzeti u obzir predznanje učenika u svim školama, i isto tako kod učenika u svim školama treba poticati intelektualnu aktivnost i razvijati eksperimentalne vještine. Svima treba pružiti najbolje što se u danom okruženju može omogućiti.

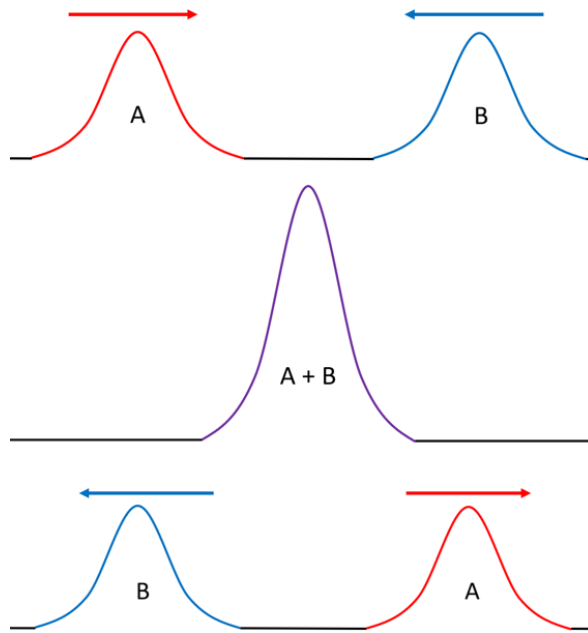
U valnoj optici može doći do velikog broja pogrešnih ideja i krivih mišljenja. Valna optika je apstraktna i zahtijeva oprezno pristupanje nastavnim sadržajima kako bi se bolje objasnili i lakše usvojili. Zato je u nastavni proces važno uklopiti pokuse i njihovu diskusiju, na koji god način se može, kako bi se otklonile poteškoće u što većem broju. Sve poteškoće je nemoguće otkloniti, pogotovo ne u tako kratkom vremenu u kojem se valna optika na nastavi obrađuje. Čak i oni koji učenju posvete više vremena, studenti, pa čak i oni koji završe fakultete uspiju zadržati pokoju pogrešnu ideju. Važno je prihvatiti svoje nedostatke i učiniti potrebne korake prema poboljšanju.

## 4 Valna optika i učeničke i studentske poteškoće u razumijevanju valne optike

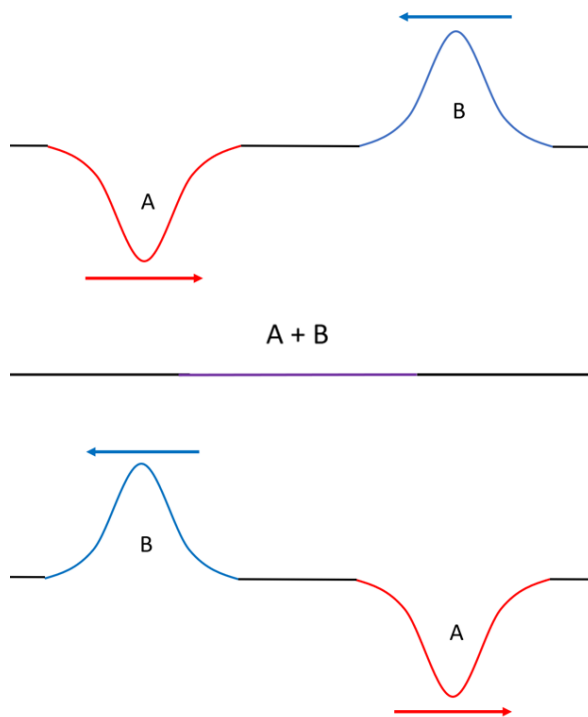
Pojave iz valne optike koje ćemo opisivati u ovom radu su, kao što smo ranije naveli: interferencija svjetlosti iz dvaju izvora (Youngov pokus), interferencija na optičkoj rešetki, ogib svjetlosti na jednoj pukotini i polarizacija svjetlosti. Obrazovni ishodi koji su obuhvaćeni ovim temama su [2]:

- 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

U srednjoj školi, prije valne optike, učenici bivaju upoznati s mehaničkim i zvučnim valovima. Tada se, između ostalih svojstava valova, učenike upoznaje s pojavom interferencije. Pojam interferencija se odnosi na bilo koji slučaj kada se dva ili više valova međusobno preklapaju (susretnu) u prostoru. Kad se to dogodi, ukupni val će u svakom trenutku biti određen principom superpozicije. Princip superpozicije vrijedi za sve valove te je najvažniji princip u valnoj optici. Princip superpozicije kaže sljedeće: Kada se dva ili više valova preklapaju, rezultatni se pomak (od ravnotežnog položaja) u bilo kojoj točki i u bilo kojem trenutku dobiva zbrajanjem trenutnih pomaka koje bi u točki proizveli pojedinačni valovi da je svaki prisutan sam [11]. Kod svjetlosnih valova, pomak će biti određena komponenta električnog ili magnetskog polja.



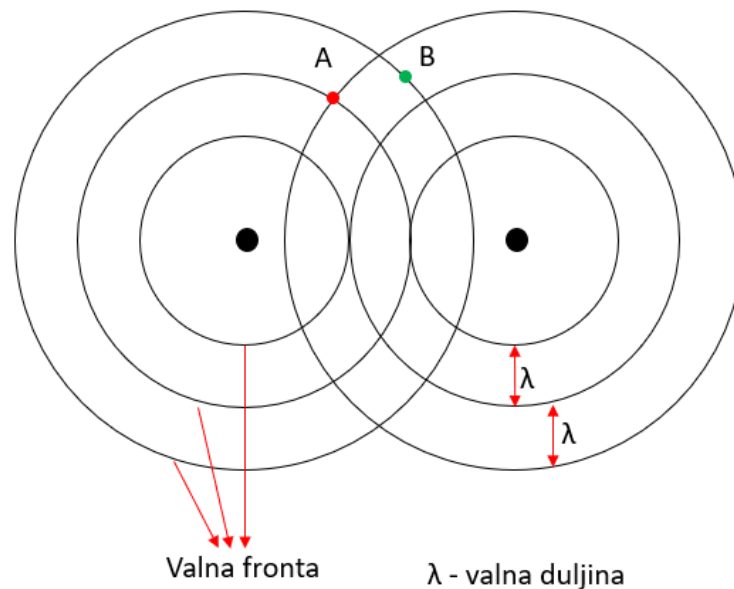
Slika 4.1: Superpozicija valova u fazi



Slika 4.2: Superpozicija valova u protufazi

Interferenciju je najlakše pokazati pomoću sinusoidalnih valnih pulseva koji imaju istu frekvenciju i valnu duljinu, kao što je prikazano na slici 4.2. U valnoj optici takav val je val monokromatske svjetlosti. Monokromatska svjetlost je svjetlost samo jedne boje, odnosno jedne valne duljine. Kao izvori takve svjetlosti najčešće se koriste

laseri. Za valove koji imaju jednake valne duljine, amplitude i konstantnu razliku u fazi (najčešće uzimamo da je razlika u fazi 0, tj. da su valovi u fazi) kažemo da su koherentni, a izvore koji ih proizvode, nazovemo koherentnim izvorima. Na slici 4.3 prikazana su dva koherentna izvora koja proizvode kružne mehaničke valove, koji će poslužiti za uvođenje pojma interferencije, a on će se potom promijeniti i na svjetlost. U svakoj točki sredstva valovi će interferirati. Koncentrične kružnice predstavljaju valne fronte (sve točke duž valne fronte dvaju valova u jednom trenutku su na jednakom pomaku od ravnotežnog položaja, najčešće valna fronta predstavlja brijeg vala), a između susjednih valnih fronti je udaljenost od jedne valne duljine.



Slika 4.3: Shematski prikaz interferencije kružnih valova iz dva koherentna izvora

Pogledajmo prvo točku *A*. Iz slike vidimo da se u njoj sreću brijegovi oba vala. Dakle, u točki *A* će se valovi sresti u fazi (brijeg i brijeg) i ondje će se trenutni pomaci od ravnoteže zbrajati, a to će rezultirati pojačavanjem titranja – nastali val će imati dvostruko veću amplitudu od valova koji su interferirali. Ovakvo pojačavanje valova, kad se u nekoj točki susretnu u fazi, zovemo konstruktivnom interferencijom. Kako bi se dogodila konstruktivna interferencija, razlika putova ( $\Delta x$ ) valova koji interferiraju mora biti jednaka cjelobrojnom višekratniku valnih duljina  $\lambda$ :

$$x_2 - x_1 = \Delta x = k\lambda, \quad (4.1)$$



gdje je  $k = 0, 1, 2 \dots$

Pogledajmo i točku  $B$ . Valovi se u točki  $B$  neće susresti u fazi, nego u protufazi (npr. brijeg prvog vala i dol drugog). Zbrajanje trenutnih pomaka sredstva pod utjecajem obaju valova će rezultirati poništenjem titranja jer dol i brijeg predstavljaju titranja u suprotnom smjeru. Amplituda konačnog vala u točki  $B$  će biti jednaka nuli. Ovakvo poništavanje valova zovemo destruktivnom interferencijom. Destruktivna interferencija se događa kada je razlika putova valova koji interferiraju jednaka neparnom višekratniku polovina valnih duljina:

$$x_2 - x_1 = \Delta x = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (4.2)$$

gdje je  $k = 1, 2 \dots$

Može se postaviti pitanje što će se dogoditi ako se u nekoj točki dva vala ne susreću ni u fazi ni u protufazi. I u toj točki će valovi interferirati, samo što će rezultantni pomak sredstva u toj točki biti manji od slučaja konstruktivne, a veći od slučaja destruktivne interferencije. Zato se prostor gdje se događa konstruktivna interferencija još naziva maksimum (interferencije), a prostor gdje se događa destruktivna interferencija se naziva minimum (interferencije). Dakle, valovi koji su izvan faze, mogu interferirati, a ukupni val će imati pomak iznosa manjeg od maksimuma i većeg od minimuma.

Prije prelaska na valnu optiku, učenici bi trebali usvojiti određena znanja i vještine vezane za valove. Po završetku učenja o mehaničkim valovima, učenici bi trebali moći:

- ispravno koristiti osnovne fizikalne veličine koje opisuju valove, kao što su valna duljina, amplituda, faza i frekvencija,
- objasniti pojam koherentnih izvora valova,
- predstaviti val pomoću kružnih valnih fronti,
- iskazati udaljenost koristeći valne duljine,
- odrediti razliku putova ili razliku faza valova koja putuju iz različitih izvora u određenu točku prostora,
- koristiti matematički zapis uvjeta za konstruktivnu i destruktivnu interferenciju.

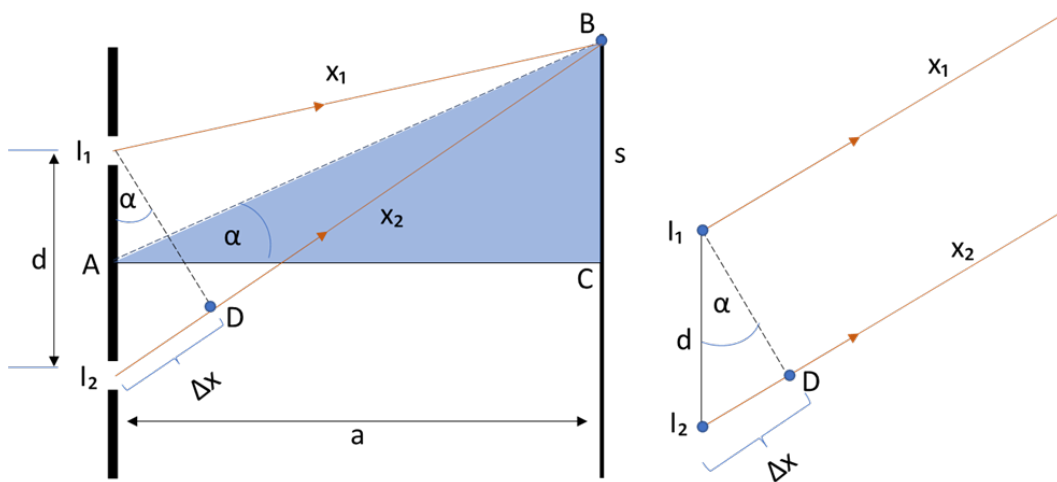
## 4.1 Interferencija svjetlosti na dvjema pukotinama – Youngov pokus

Razrada ranije navedenih obrazovnih ishoda za interferenciju svjetlosti na dvije pukotine može sadržavati sljedeće ishode [4]:

- opisati Youngov pokus i interferencijsku sliku svjetlosti
- objasniti nastanak interferencijske slike svjetlosti pomoću mehaničkog modela valova
- objasniti važnost koherentnih izvora za postizanje stalne interferencijske slike
- istražiti i opisati o kojim veličinama i kako ovisi interferencijska slika dobivena pomoću dvaju točkastih izvora svjetlosti
- objasniti i primijeniti izraz  $s = \lambda a/d$
- odrediti geometrijsku razliku putova iz dvaju izvora do neke točke
- navesti i objasniti uvjet konstruktivne i destruktivne interferencije valova pomoću shematskog prikaza kružnog vala
- primijeniti uvjete konstruktivne i destruktivne interferencije na primjerima
- odrediti razliku putova za maksimume i minimume na slici iz Youngovog pokusa
- razvijati znanstveno zaključivanje (osmišljanje pokusa, kontrola varijabli, testiranje hipoteza)
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

Youngovim pokusom se pokazuje interferencija dvaju svjetlosnih valova. Potreban pribor se sastoji od lasera, dviju vrlo uskih paralelnih pukotina (toliko uske da ih možemo smatrati točkastim izvorima svjetlosti) i zastora. Danas se pri izvođenju pokusa s interferencijom svjetlosti najčešće koriste laseri. Kad svjetlost prođe kroz pukotine, one postaju dva koherentna izvora svjetlosti, a na zastoru se dobivaju ekvidistantne svijetle pruge koje su sve jednakog intenziteta. Pukotine kod Youngovog

pokusa možemo smatrati dvama točkastim izvorima valova koji se šire u svim smjerovima. Različite zrake će se na određenim točkama na zastoru sretati u fazi ili u protufazi. Da bi se susrele u fazi, kako smo ranije objasnili, dvije zrake moraju imati razliku putova jednaku cijelom broju valnih duljina, odnosno moraju se sresti brijeg ili dol jednog vala s brijegom ili dolom drugog. Ako se na nekoj točki na zastoru dvije zrake sretnu u fazi tamo ćemo dobiti svijetli maksimum, odnosno, zrake će u toj točki konstruktivno interferirati. Ako se pak na nekoj točki na zastoru dvije zrake sretnu u protufazi tamo će biti tama jer će se brijeg jedne zrake i dol druge zrake međusobno "poništit" te će u toj točki zrake interferirati destruktivno.



Slika 4.4: Shematski prikaz nastanjanja interferencijskog uzorka

Dvije pukotine, odnosno dva izvora svjetlosnih valova  $I_1$  i  $I_2$  nalaze se na međusobnoj udaljenosti  $d$ . Daleki zastor od pukotina se nalazi na udaljenosti  $a$ . U točki  $C$  svjetlost iz oba izvora konstruktivno interferira jer je ona jednako udaljena od oba izvora, što znači da je u točki  $C$  maksimum. Pretpostavimo da zrake svjetlosti iz svakog izvora, koje se susreću u točki  $B$ , ondje interferiraju konstruktivno, što znači da je i u točki  $B$  maksimum. Točka  $B$  je od točke  $C$  udaljena za  $s$  i  $s$  označava udaljenost između svaka dva susjedna maksimuma, jer su maksimumi ekvidistantni. Zraka iz izvora  $I_1$  do točke  $B$  prijeđe put  $x_1$ , a zraka iz izvora  $I_2$  prijeđe put  $x_2$ . Razlika putova tih zraka utjecat će na vrstu interferencije u točki  $B$ . Na slici 4.4 vidimo dva slična pravokutna trokuta, trokut  $ACB$  i trokut  $I_1I_2D$ . Oba trokuta imaju kut  $\alpha$ . Možemo izraziti iz trokuta  $ACB$   $\text{tg}(\alpha) = s/a$ , a iz drugog trokuta  $\sin(\alpha) = \Delta x/d$ . Ako pretpostavimo da je zastor jako daleko, kut alfa će biti jako mali, a za male kutove vrijedi da je  $\sin(\alpha) \approx \text{tg}(\alpha) \approx \alpha$ . Nadalje, ako je zastor jako daleko, možemo reći

da će zrake iz prvog i drugog izvora biti međusobno paralelne. Iz ranijih jednakosti možemo zapisati  $s/a = \Delta x/d$ , odnosno:

$$s = \frac{\Delta x a}{d}, \quad (4.3)$$

a pošto smo rekli da je u točki  $B$  maksimum, konačno možemo napisati:

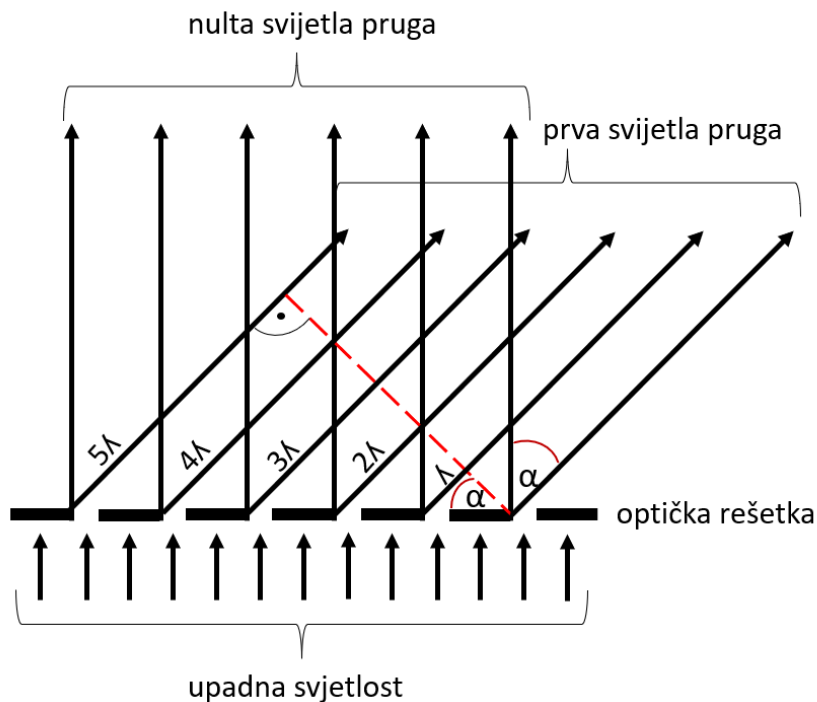
$$s = \frac{\lambda a}{d}. \quad (4.4)$$

## 4.2 Optička rešetka

Razrada obrazovnih ishoda za interferenciju na optičkoj rešetki može sadržavati sljedeće ishode [4]:

- opisati interferencijsku sliku dobivenu pomoću optičke rešetke
- protumačiti značenje pojmova: konstanta optičke rešetke, središnji maksimum, maksimum  $k$ -tog reda
- istražiti o kojim veličinama i kako (kvalitativno) ovisi interferencijska slika dobivena pomoću optičke rešetke
- objasniti i primijeniti uvjet za maksimum interferencije na optičkoj rešetki,  $d \sin \alpha = k\lambda$
- navesti primjere optičke rešetke u prirodi i svakodnevnom životu
- razvijati znanstveno zaključivanje (osmišljanje pokusa, kontrola varijabli, testiranje hipoteza)
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

Interferencijska slika kod optičke rešetke slična je interferencijskoj slici kod pokusa s dvije pukotine, no pošto su pukotine kod rešetke jako blizu jedna drugoj, maksimumi će biti udaljeniji nego što je to slučaj kod pokusa s dvije pukotine. Maksimumi će biti ekvidistantni, ali zbog interferencije više valova, bit će jačeg intenziteta u odnosu na maksimume kod interferencije na dvije pukotine.



Slika 4.5: Shematski prikaz nastajanja interferencijskog uzorka kod optičke rešetke

Na slici 4.5 je shematski prikaz nastajanja maksimuma kod optičke rešetke. Sve zrake koje će tvoriti prvi maksimum ( $k = 1$ ) imaju međusobne razlike putova koje su cjelobrojni višekratnici valne duljine. Udaljenost između susjednih pukotina je  $d$  i iz pravokutnog trokuta možemo prepoznati:

$$\sin(\alpha) = k \frac{n\lambda}{nd}, \quad (4.5)$$

gdje je  $n$  redni broj zadnje zrake koja je kateta odabranog trokuta sa slike, ali i redni broj pukotine iz koje ta zraka dolazi. (Na našoj slici je  $n = 5$ )

Dakle, neovisno o rednom broju zrake, imat ćemo:

$$\sin(\alpha) = k \frac{\lambda}{d}, \quad (4.6)$$

odnosno,

$$d \sin(\alpha) = k\lambda, \quad (4.7)$$

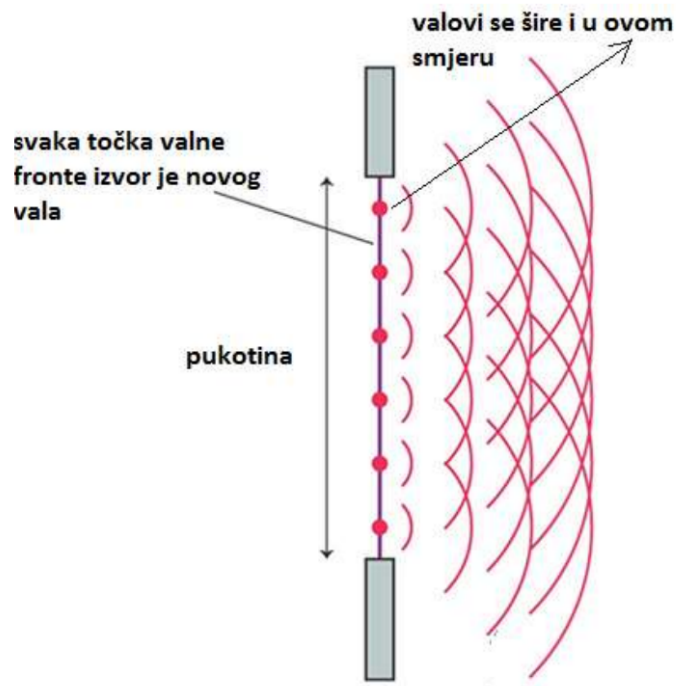
što je uvjet za konstruktivnu interferenciju na optičkoj rešetki. I ovdje je  $k$  redni broj maksimuma ( $k = 0, 1, 2 \dots$ ).

### 4.3 *Ogib svjetlosti na pukotini*

razrada obrazovnih ishoda za ogib može uključivati sljedeće ishode [4]:

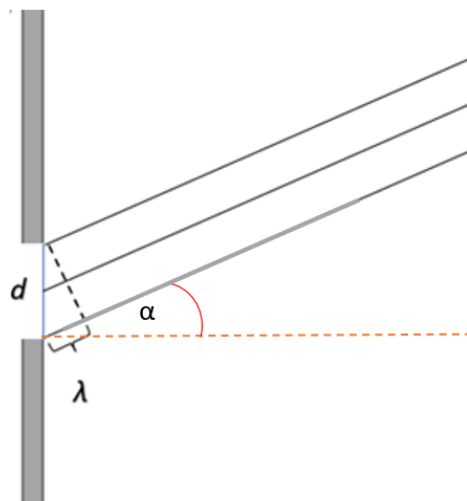
- opisati pojavu ogiba svjetlosti na uskoj pukotini
- objasniti ogib svjetlosti pomoću Huygens - Fresnelovog načela i interferencije
- objasniti kvalitativno uvjet za opažanje ogibne slike (odnos veličine pukotine i valne duljine svjetlosti)
- istražiti promjenu širine središnjeg maksimuma s promjenom širine pukotine
- razvijati znanstveno zaključivanje (osmišljanje pokusa, kontrola varijabli, testiranje hipoteza)
- razvijati sposobnost sistematičnog opažanja i opisivanja pokusa

Ogib je svojstvo valova da zalaze iza prepreke ili u područje geometrijske sjene. Dakle, ogib se pojavljuje i kod svjetlosnih valova. U svakodnevnom životu takvo što ne možemo iskusiti, bar ne često, jer znamo da neprozirni predmeti stvaraju sjenu. No, kad govorimo o ogibu svjetlosti, moramo uzeti u obzir malene prepreke, prepreke široke do 1000 valnih duljina svjetlosti. Osim na prepri, ogib se pojavljuje i kada svjetlost prolazi kroz malenu pukotinu. Jednostavna demonstracija ogiba može se izvesti ako između izvora svjetlosti i lica stavimo dva prsta (kažiprst i palac) kao da njima nešto želimo uhvatiti i polako ih približavamo jedan drugome. U jednom trenutku, kad prsti budu dovoljno blizu, između njih će se pojaviti tamne linije paralelne s prstima. Osim takve jednostavne demonstracije, za demonstraciju ogiba se najčešće izvodi klasični pokus gdje se kroz usku pukotinu pušta monokromatska svjetlost, a ogibna slika se promatra na udaljenom zastoru. Na zastoru će se vidjeti središnja svijetla pruga, oko nje će biti tamne pruge, potom opet svijetle i tako će se izmjenjivati. Treba naglasiti da je središnja svijetla pruga najšira i najvećeg intenziteta i što se više udaljavamo od nje to će svijetle pruge biti uže i manjeg intenziteta. Svjetlosni val koji dolazi na pukotinu možemo usporediti s valom na vodi. Kada val dođe na pukotinu, svaku točku vala možemo zamisliti kao izvor novog, polukružnog vala. To načelo se zove Huygensovo načelo i govori da svaki dio valne fronte u pukotini možemo tretirati kao izvor novog vala koji se polukružno širi u svim smjerovima.



Slika 4.6: Shematski prikaz širenja vala kroz usku pukotinu (Slika iz nastavne pripreme za ogib [4])

Slika 4.6 shematski prikazuje ogib vala. Kružne linije iza pukotine predstavljaju polukružne valove koji nastaju u samoj pukotini prema Huygensovom načelu. Ako razmotrimo širenje svjetlosti na dalekom zastoru iza pukotine (pretpostavimo da je zastor dovoljno daleko da su zrake koje na njega dolaze međusobno paralelne), rekli smo, vidjet ćemo svijetle i tamne pruge. Hoće li na nekoj točki na zastoru biti svjetlo ili tama ovisi o tome hoće li se zrake koje dolaze iz pukotine u toj točki sresti u fazi ili u protufazi.



Slika 4.7: Shematski prikaz nastanjanja ogibnog uzorka

Pomoću slike 4.7 ćemo objasniti uvjet koji je potreban da nastane tamna pruga na ogibnoj slici. Na slici 4.7 vidimo tri zrake koje dijele snop svjetlosti koji izlazi iz pukotine pod određenim kutom  $\alpha$ . Gornja i donja su na rubovima, a srednja je točno na sredini pukotine. Sve zrake padaju na daleki zastor. Ako je razlika u putovima između gornje i donje zrake jednaka valnoj duljini, razlika putova između gornje zrake i zrake sa sredine pukotine će biti pola valne duljine i te dvije zrake će u točki susreta interferirati destruktivno. Nadalje, ako uzmemo sada zraku koja je u snopu svjetlosti tik ispod gornje i zraku koja je tik ispod srednje, za njih će isto vrijediti da će na zastoru interferirati destruktivno. Tu analogiju možemo provesti za sve zrake snopa. Dakle svaka će zraka iz gornje polovice snopa imati svoj par iz donje polovice snopa s kojom će destruktivno interferirati i na zastoru ćemo u toj točki pod promatranim kutom  $\alpha$  imati tamnu prugu, tj. minimum. Sličnu analizu bismo mogli provesti za slučaj razlike putova od  $2\lambda$ , ali bismo tada morali pukotinu dijeliti na četiri dijela, a općenito za razliku putova  $2\lambda$  na  $2k$  dijela. Sada možemo matematički zapisati uvjet postojanja minimuma:

$$d \sin(\alpha) = k\lambda, \quad (4.8)$$

gdje je kut  $\alpha$  kut pod kojim se vidi  $k$ -ti minimum,  $k$  je redni broj minimuma ( $k = 1, 2 \dots$ ),  $\lambda$  je valna duljina, i  $d$  je širina pukotine.



#### **4.4 Polarizacija svjetlosti**

Razrada obrazovnih ishoda za polarizaciju može sadržavati sljedeće ishode [4]:

- opisati pokuse kojima se demonstrira polarizacija svjetlosti
- opisati razliku titranja električnog polja kod polarizirane i nepolarizirane svjetlosti
- navesti primjere izvora svjetlosti koji daju polariziranu ili nepolariziranu svjetlost
- istražuje polarizaciju reflektirane svjetlosti

Polarizacija svjetlosti je još jedan od fenomena iz valne optike. Polarizacija nam ujedno pokazuje da je svjetlost transverzalni val. Kod svjetlosnog vala, za razliku od mehaničkih valova, titraju električno i magnetsko polje, zato je svjetlost elektromagnetski val. Ta dva polja su međusobno okomita, a oba su okomita na smjer širenja svjetlosnog vala. Takvu svjetlost u kojoj električno polje titra duž samo jedne osi, koja je okomita na smjer širenja vala, zovemo linearno polariziranom svjetlosti. Nepolarizirana svjetlost se sastoji od mnogo valova koji titraju u svim mogućim smjerovima okomitim na smjer širenja vala. Ako bi se takva svjetlost pustila kroz polarizirajuće sredstvo (polarizator), samo bi val, čije bi električno polje titralo duž osi polarizatora, prošao kroz njega. Polarizirajuća sredstva su građena od materijala čija se struktura sastoji od dugih paralelnih lanaca molekula. Pri prolasku nepolarizirane svjetlosti kroz takvo sredstvo, svi će valovi, osim onog čije električno polje titra okomito na lance molekule, biti apsorbirani. Dakle os polarizacije je okomita na lance molekula u polarizatorima. Za razumijevanje polarizacije, a tako i ostalih fenomena iz valne optike, mora postojati dobro prethodno razumijevanje valnog modela svjetlosti.

#### **4.5 Poteškoće u razumijevanju valne optike**

Glavne poteškoće uočene u raznim istraživanjima vezane uz interferenciju i ogib svjetlosti opisane su i sistematizirane u nastavku prema [3].

### **1) Poteškoće u razlikovanju situacija u kojima je primjenjiva geometrijska i situacija u kojima je primjenjiva valna optika**

Učenici se u kratkom vremenu susreću s načelima i fenomenima iz geometrijske i valne optike, što može stvoriti zbrku između domena i područja gdje vrijede geometrijska i valna optika, što rezultira time da učenici često pokušavaju koristiti geometrijsku optiku za objašnjenje fenomena valne optike [8, 10]. Na primjer, neki studenti skloni su tumačiti središnji ogibni maksimum kao geometrijsku sliku osvijetljene uske pukotine, a neki od njih pogrešno predviđaju da će sužavanje pukotine rezultirati užim središnjim ogibnim maksimumom [8].

### **2) Formiranje hibridnih modela s elementima geometrijske i valne optike**

Neki studenti kombiniraju geometrijsku i valnu optiku kada pokušavaju objasniti neke fenomene valne optike. Na primjer, kada objašnjavaju ogib na jednoj pukotini, primjenjuju načela geometrijske optike za svjetlost koja prolazi kroz sredinu proreza (svjetlost prolazi neometano) i načela valne optike za svjetlost koja prolazi blizu rubova proreza (u njihovom tumačenju, samo rubovi postaju novi izvori svjetlosti, uzrokujući ogib) [8, 10].

### **3) Poteškoće s modeliranjem situacije na jednoj pukotini**

Jedna od uobičajenih učeničkih tendencija je tretirati svaki prorez, bez obzira na njegovu širinu, kao jedan točkasti izvor svjetlosti [8, 10]. Djelomičan uzrok toga može biti što su pukotine, u analizi interferencije kod pokusa s dvije pukotine i interferencije kod optičke rešetke na srednjoškolskoj razini, konceptualizirane kao točkasti izvori svjetlosti. Rubove pukotine učenici često pogrešno smatraju ključnima za ogib svjetlosti, a neki ih smatraju jedinim novim izvorima svjetlosti ili nečim što reflektira, lomi upadne zrake svjetlosti. Neki od studenata pukotine smatraju i polarizatorima, smatrajući da svjetlost koja prolazi kroz nju postaje polarizirana [5, 8].

#### **4) Poteškoće u razumijevanju valova, svojstava valova i interakcija među valovima**

Neki studenti muče se s osnovnim svojstvima valova, kao što su njihova valna duljina i amplituda, a ponekad ih miješaju [8–10]. Valovi se ponekad tretiraju kao objekti, jer neki učenici misle da se dva vala mogu odbiti jedan od drugoga ako se susretnu. Učenici često imaju poteškoća sa shvaćanjem da zbroj valova može imati manju amplitudu od pojedinačnih valova. Interferenciju svjetlosti neki studenti doživljavaju kao pojavu koja uvijek rezultira pojačanjem valova i većom amplitudom rezultirajućeg vala [10].

#### **5) Poteškoće prilikom izražavanja udaljenosti preko valnih duljina**

Učenici često imaju probleme kod izražavanja udaljenosti preko valnih duljina, što je neophodno za određivanje razlike putova kao uvjeta za nastajanje konstruktivne i destruktivne interferencije [8, 10].

#### **6) Poteškoće u razumijevanju uloge razlike putova**

Mnogi učenici ne razumiju ključnu ulogu razlike putova za određivanje položaja minimuma i maksimuma interferencije svjetlosnih valova. Teško im je shvatiti da se promjena u početnoj razlici faza između više koherentnih valova, koji putuju kroz isti medij, može dogoditi samo ako postoji razlika u njihovim duljinama puta. Učenici mogu pogrešno misliti da je interferencija valova u nekoj točki prostora određena ukupnom duljinom puta valova, ili relativnim smjerom gibanja valova, zaključujući da valovi koji se kreću u istom smjeru uvijek interferiraju konstruktivno, a oni koji se kreću u suprotnim smjerovima uvijek interferiraju destruktivno [8, 9].

#### **7) Poteškoće s relativnom veličinom širine proreza i valne duljine/amplitude svjetlosti kod ogiba**

Jedan od uvjeta da se ogibni minimumi pojave na zastoru je da širina pukotine bude veća od valne duljine ulazne svjetlosti. Neki učenici pogrešno zaključuju da za pojavu difrakcijskog uzorka širina pukotine mora biti jednaka ili manja od valne duljine svjetlosti [6]. Studenti također imaju tendenciju pripisivati prostorne karakteristike titranju električnog polja svjetlosnog vala, zaključujući da svjetlosni val može ili ne može proći kroz prorez, ovisno o njegovoj veličini, ili da će proći samo djelić njegove izvorne amplitude [8–10].

## **8) Poteškoće s konceptima moderne fizike u kontekstu valne optike**

Nakon uvođenja pojmova moderne fizike, poput fotona, neki studenti pokušavaju kombinirati valne i fotonske karakteristike, što ponekad rezultira pogrešnim zaključcima da se fotoni gibaju poput sinusnog vala ili da se fotoni gibaju u ravnoj liniji koja se savija blizu rubova pukotine [8, 9].

## **9) Poteškoće s predviđanjem i razlikovanjem uzoraka proizvedenih u fenomenima valne optike**

Studije praćenja pokreta očiju (eye tracking) pri rješavanju zadataka [6] pokazuju da se studenti bore s razlikovanjem uzoraka dobivenih u osnovnim eksperimentima valne optike. Iako se na prvi pogled može činiti da je ovo zadatak jednostavnog prepoznavanja, razlikovanje uzoraka valne optike čini se složenim kognitivnim zadatkom, budući da zahtijeva poznavanje i traženje različitih značajki svakog uzorka, kao što sugeriraju pokreti očiju učenika [6], kao i njihove poteškoće sa sličnim pitanjima u konceptualnom testu iz valne optike (Conceptual Survey on Wave Optics) [7]. U kontekstu pokusa s dvije pukotine neki učenici pogrešno vjeruju da svaka osvijetljena pukotina u pokusu proizvodi jednu polovicu interferencijskog uzorka i predviđaju da bi, ako bi jedan od njih bio prekriven neprozirnim materijalom, uzorak bio samo pola početnog uzorka, očekujući da će njegova lijeva strana, desna strana ili svaki drugi maksimum nestati [6]. Drugi studenti misle da svaki prorez proizvodi cijeli uzorak i očekuju da bi prekrivanje jednog proreza rezultiralo istim uzorkom smanjenog intenziteta [8].

## **10) Pojednostavljivanje složenih pojava**

Iako su interferencija i difrakcija svjetlosti temeljni fenomeni valne optike, oni su prilično složeni, a njihovo objašnjenje zahtijeva više koraka u zaključivanju. Učenici su ponekad skloni pojednostavljivanju složenih pojmova i pojava reducirajući ih na jednostavnije ili izostavljajući neke korake u svom zaključivanju, kao što je tretiranje svih pukotina (bez obzira na njihovu širinu) kao točkastih izvora [8] ili zamjena razlike duljine puta s ukupnom duljinom puta u uvjetima konstruktivne/destruktivne interferencije [8].

## **4.6 Rezultati intervjuja s hrvatskim srednjoškolicima**

Spomenuli smo projekt IP-2018-01-9085 pod nazivom „Utjecaj uključivanja istraživačkih učeničkih pokusa u srednjoškolsku nastavu fizike na razvoj znanstvenog zaključivanja i konceptualnog razumijevanja“. U sklopu tog projekta provedeno je 27 demonstracijskih intervjuja sa srednjoškolicima iz Zagreba nakon njihove redovne nastave valne optike. Učenici koji su bili intervjuirani morali su odgovoriti na pitanja vezana za standardne školske pokuse iz valne optike. Morali su opisati svoja predviđanja popraćena crtežima uzoraka na zastoru. Potom su im pokusi bili pokazani i morali su detaljno komentirati što su opazili, također uz crtež uzorka kojeg su vidjeli. Na kraju su morali objasniti kako i zašto pojedina slika na zastoru nastaje [3]. U nastavku slijedi ukratko opisan tijek, zapažanja i zaključci dobiveni istraživanjem.

### **1) Predviđanja**

Prvi pokus je bio interferencija svjetlosti na dvije pukotine. Samo je 7 učenika dalo točno predviđanje da će se na zastoru pojaviti ekvidistantni maksimumi. Neki učenici su previdjeli središnji maksimum većeg intenziteta, dok su neki očekivali da će intenzitet svih maksimuma biti slabiji nego intenzitet središnjeg maksimuma. Najzastupljenije pogrešno predviđanje je da će na zastoru biti samo dvije svijetle točke, a najčešće objašnjenje je bilo da će zapreka između pukotina "prepoloviti" snop i da će se zato na zastoru vidjeti dvije točke. Neki učenici su previdjeli vertikalne pruge na zastoru jer su i pukotine takvog oblika. U udžbenicima se vrlo često kao prikaz interferencije pokazuju svijetle pruge, što se ne može izvesti sa standardnom opremom jer laserska svjetlost je uzak snop koji na zastoru daje točku, tako da će i interferencijski uzorak biti ekvidistantne točke. Dvoje učenika je previdjelo maksimume raspoređene vertikalno uz objašnjenje da svjetlost jedino u tom smjeru može proći kroz pukotine.

Drugi pokus je bio interferencija na optičkoj rešetki. U pokusu su se koristile dvije optičke rešetke, od 80 zareza/mm i 300 zareza/mm. Iako su gotovo svi učenici previdjeli pojavu maksimuma, pretpostavke samo njih 7 se moglo smatrati točnima. Neki su očekivali gušću raspodjelu maksimuma, uz objašnjenje da na rešetki ima mnogo više pukotina nego u prijašnjem pokusu s dvije pukotine. Jedan učenik je očekivao 80 svijetlih i 80 tamnih linija jer je mislio da oznaka 80 l/mm znači 80 pukotina na cijeloj rešetki i da svaka pukotina proizvodi svoj maksimum. Dvoje ih je

očekivalo vertikalnu raspodjelu maksimuma, ali to nisu bili isti koji su to predvidjeli u prošlom pokusu. Poslije je bila postavljena druga optička rešetka s 300 zareza/mm. 17 učenika je dalo točno predviđanje što se tiče promjene na interferencijskoj slici. Među onima koji su dali netočno predviđanje bilo je onih koji su očekivali gušće maksimume jer ima više pukotina po milimetru, a isti učenik je očekivao 300 svijetlih linija jer sad ima optičku rešetku s 300 pukotina.

Još jedan pokus koji je koristio optičku rešetku bila je interferencija bijele svjetlosti na optičkoj rešetki. Jedan učenik je točno predvidio središnji bijeli maksimum i postojanje maksimuma višeg reda i točan redoslijed boja u njima, jedino je imao krivo objašnjenje nastajanja boja lomom svjetlosti. Mnogo drugih učenika je predviđalo nastajanje spektra jer su prije samog pokusa mogli izbliza pogledati optičku rešetku pa su neki od njih kroz rešetku pogledali svjetlo na stropu prostorije. Neki nisu bili sigurni hoće li spektar biti kontinuiran ili diskretan, ili koja će boja biti prva, ljubičasta ili crvena.

Zadnji pokus je bio ogib na pukotini. Gotovo svi su imali točna predviđanja za široku pukotinu; na zastoru će se vidjeti jedna svijetla točka. Također su uzeli u obzir odnos širine pukotine i širine laserske zrake, a pošto je pukotina bila šira, objasnili su da, pošto nema prepreke, neće doći do pojave minimuma i maksimuma. Pokus s uskom pukotinom bio je najteži za učenike. Samo je jedna učenica dala točno predviđanje, dok ih je 9 dalo bar djelomično točna; predvidjeli su postojanje više maksimuma, ali s malim ili nikakvim razlikama u odnosu na pokus s dvije pukotine. Ostali učenici su očekivali manju točku na zastoru nego ranije jer je pukotina uža, neki su očekivali usku vertikalnu, a neki horizontalnu prugu. Općenito možemo reći da su učenici imali puno problema s predviđanjima ishoda standardnih pokusa iz valne optike.

## **2) Opažanja**

Opisi opažanja kod mnogih učenika bili su nepotpuni te se moglo uočiti da im nedostaje sposobnost sustavnog opažanja pokusa. Češće su opisivali intenzitet maksimuma nego razmak između maksimuma. Najčešće su samo usporedili ono što su očekivali i ono što su opazili i komentirali najistaknutije značajke uzorka. Kod pokusa s dvije pukotine, mnogo učenika koji su predvidjeli dvije točke su samo komentirali kako ih ima više od dvije. Učenici koji su predvidjeli vertikalni uzorak bili su

iznenađeni vidjevši horizontalni uzorak jer su mislili da oblik pukotine jedini ima veze s oblikom ogibne slike. Neki su pokazali nepoznavanje terminologije koja se koristi u fizici. Neki su maksimume nazivali "točkama" ili "linijama", jedan ih je učenik čak nazvao "valnim duljinama", dok su neki interferencijski uzorak nazivali "isprekidanom crvenom linijom". Slične poteškoće u opisivanju opažanja su prevladavale i nakon izvođenja pokusa s optičkom rešetkom. Najistaknutija značajka ogibnog uzorka u pokusu na jednoj pukotini je najveći intenzitet središnjeg maksimuma i maksimumi višeg reda sve manjeg intenziteta, što je mnogo učenika opazilo. Jedna je učenica objasnila da upravo po tome razlikuje ogibni i interferencijski uzorak. U pokusu s rasapom bijele svjetlosti svi učenici su opazili pojavu spektara boja, a samo 12 je prepoznalo spektre kao maksimume višeg reda.

### 3) Objašnjenja

Za pokus na dvije pukotine, samo pet učenika je dalo ispravno objašnjenje, a drugih pet je dalo djelomično ispravna objašnjenja. Učenici koji su dali neispravna objašnjenja, najčešće su objasnili pojavu interferencije kao „slamanje“ svjetlosti, a to slamanje su prepisivali plastici (prepreci) između pukotina. To "slamanje" su učenici koristili da objasne maksimume kao dijelove svjetlosne linije koja se slomila na prepreci između dvije pukotine. Pet učenika je u svojim objašnjenjima koristilo različita znanja iz fizike. Jedan učenik je smatrao valove objektima, koji se, nakon što se slome na prepreci, međusobno odbiju i da se na zastoru pojave maksimumi gdje ti odbijeni dijelovi završe. Troje učenika su dali oskudna ili nikakva objašnjenja.

U pokusu s optičkom rešetkom učenici su trebali prepoznati da se optička rešetka sastoji od mnogo pukotina među kojima je razmak uži nego kod pokusa s dvije pukotine. Svaka ta pukotina se tretira kao poseban izvor svjetlosti. Zato su maksimumi većeg međusobnog razmaka i većeg intenziteta nego u pokusu s dvije pukotine. Šest učenika je dalo zadovoljavajuće objašnjenje. Svi su komentirali nastajanje maksimuma konstruktivnom interferencijom, no nisu komentirali intenzitet maksimuma. Jedna je učenica, u pokušaju da objasni veću udaljenost među maksimumima, na kraju rekla da joj to nije logično. Neki učenici su smatrali da svaki maksimum nastaje prolaskom svjetlosti kroz drugu pukotinu. Njihova objašnjenja su bila varijacije na istu ideju. Neki su učenici ponovno govorili o „slamanju“ svjetlosti na optičkoj rešetki. Jedan je učenik mislio da je optička rešetka načinjena od slomljenog stakla i

da se svjetlost, dok prolazi kroza nj, lomi.

Kod pokusa s interferencijom bijele svjetlosti, većina učenika je predvidjela pojavu spektara boja, no nijedan učenik nije znao objasniti kako spektar boja nastaje. Jedan je učenik iskoristio matematički izraz za optičku rešetku i objasnio da će crvena svjetlost imati najveći kut loma zbog toga što ima najveću valnu duljinu. Jedan se sjetio staklene prizme i loma svjetlosti, no nije uspio objasniti zašto se rasap bijele svjetlosti dogodio na optičkoj rešetki. Jedan učenik je tvrdio da je rastavljanju bijele svjetlosti na boje na optičkoj rešetki, optičkoj rešetki pridonijela sabirna leća, koja je sastavni dio pokusa, a služi za fokusiranje svjetlosti na rešetku. Učenici koji su u ranijim pokusima spominjali „slamanje“ svjetlosti, i ovdje su objasnili da se svjetlost na rešetki lomi na različite boje.

Pokus s ogibom na jednoj pukotini se razlikuje od pokusa s dvije uske pukotine optičke rešetke jer u ovom se slučaju pukotina ne može smatrati točkastim izvorom svjetlosti. Umjesto toga se koristi Huygensovo načelo koje tretira svaku točku duž valne fronte kao novi izvor polukružnog vala. Samo je jedan učenik istaknuo da kod pokusa s jednom pukotinom promatramo pukotinu kao mnoštvo novih izvora. Isti učenik nastajanje maksimuma nije smatrao „pravom“ konstruktivnom interferencijom, nego se sjetio da se, naprosto, sve zrake duž pukotine međusobno ne poništavaju. Mnogo učenika je, vidjevši ogibni uzorak, tvrdilo da za nastajanje takvog uzorka moraju postojati dva izvora. Tako su neki samo rubove pukotine smatrali novim izvorima i sveli jednu pukotinu na situaciju s dvije pukotine. Na pitanje prolazi li svjetlost sredinom pukotine, jedan od učenika koji je sveo pukotinu na dva izvora na rubovima, rekao je da je prostor između rubova jako malen i da cijeli val ne može proći te da prolazi samo dio vala. Jedna učenica je također smatrala rubove pukotine novim izvorima, ali je tvrdila da svjetlost kroz sredinu pukotine prolazi neometano, primijenivši hibridni model geometrijske i valne optike. Nekoliko učenika je bilo zbunjeno ogibnim uzorkom jer ga nisu očekivali u pokusu s jednom pukotinom i nisu mogli objasniti zašto je uzorak nastao. Jedan je učenik bio jako iznenađen ogibnim uzorkom jer je ranije interferencijski uzorak opisao kao „slamanje“ svjetlosti, no ovdje nije bilo zapreke koja bi slomila svjetlost. Zatim je objasnio da u ovom slučaju sužavanje pukotine „slama“ svjetlost. Jedan učenik je primijetio središnji maksimum i objasnio njegovu vidljivost zato što pukotina nije dovoljno uska, odnosno, da bi sužavanje pukotine suzilo i središnji maksimum. 11 učenika je ponudilo oskudno ili



nikakvo objašnjenje.

#### **4.7 Učeničke poteškoće s polarizacijom svjetlosti**

U okviru intervjua učenicima je postavljeno pitanje da objasne polarizaciju svjetlosti. U njihovim odgovorima uočene su sljedeće glavne poteškoće [5]:

- brkanje smjera titranja i širenja svjetlosti ("polarizirana svjetlost se širi samo u jednom smjeru, a nepolarizirana u svim smjerovima")
- isključivo fokusiranje na intenzitet ("polarizacija je oslabljivanje svjetlosti")
- pokušaj objašnjavanja polarizacije geometrijskom optikom ("polarizirajuće naočale lome ili reflektiraju svjetlost i tako joj smanjuju intenzitet")
- brkanje polarizatora i pukotine ili optičke rešetke ("svaka pukotina je polarizator" ili "polarizirajući filter ima pukotine na sebi")

Puno učeničkih poteškoća moglo se povezati s krivim tumačenjem standardnih shematskih prikaza polarizacije u nastavi, kao i analogija s polarizacijom mehaničkih valova.

Ova istraživanja [3,5] pokazala su da hrvatski srednjoškolci imaju mnoge poteškoće u razumijevanju fenomena iz valne optike. Problemi su postojali i kod predviđanja, opisivanja i objašnjavanja interferencijskih i ogibnih uzoraka kao i polarizacije svjetlosti. Jasno je da mnogi učenici nisu usvojili valni model svjetlosti tijekom nastavnog procesa. Dalo se zaključiti da je većina učenika svoja objašnjenja oblikovala u tom trenutku kad se od njih objašnjenje tražilo, iznoseći ideje koje su im u tom trenutku imale najviše smisla te da nisu formirali čvrste modele pojava tijekom nastave valne optike. Najčešće su pogrešno rabili geometrijsku i valnu optiku (očekivanje da će sužavanje pukotine suziti središnji maksimum ili očekivanje ogibnog uzorka za široke pukotine ili objašnjavanje nastajanja maksimuma lomom svjetlosti). Ako pogledamo učeničke odgovore u okvirima teorijskog pristupa "znanja u dijelovima", može se vidjeti da mnoga od njihovih predviđanja, opažanja i objašnjenja mogu biti objašnjena aktivacijom određenih p-primova ili korištenjem drugih resursa, kao što su koncepti iz geometrijske optike [3].

U istraživanju [3] je objašnjeno da se odgovori učenika mogu analizirati iz dviju različitih teorijskih perspektiva: znanja kao teorije i znanja u dijelovima. Znanje kao teorija pretpostavlja da je naivno znanje učenika nalik teoriji, strukturirano i suvislo, da sadrži velike i stabilne strukture, kao što su relativno čvrste ideje i mentalni modeli. Znanje u dijelovima pretpostavlja da se znanje učenika sastoji od brojnih manjih kognitivnih elemenata, zvanih kognitivni resursi. Najvažniji od njih su osnovni elementi zaključivanja, eng. phenomenological primitives, (p-prims), konceptualni i epistemološki resursi. Resursi su manji ili veći elementi predznanja učenika koji se mogu aktivirati sami ili s drugim resursima tijekom procesa zaključivanja. Resursi su često ovisni o kontekstu, što znači da se aktiviraju određenim kontekstom, a moguće je i prilično uobičajeno da učenici istovremeno aktiviraju više resursa, od kojih neki mogu čak i proturječiti jedni drugima. Elementi zaključivanja ne moraju nužno biti točni ili netočni. Oni predstavljaju intuitivni put rasuđivanja koji je prilično očigledan osobi koja drži taj element. Primjer p-prima je *bliže je jače*, i osoba ga može primijeniti ako razmišlja o tome kakvi će biti efekti ako se nešto nalazi bliže ili dalje od nekakvog izvora. Npr. ako smo bliže vatri bit će nam toplije. Taj se p-prim može primijeniti i kad se razmišlja o tome na koji će objekt djelovati jača gravitacijska sila, tijelo bliže ili dalje Suncu. Ali, ako se primijeni npr. za razlog izmjene godišnjih doba na Zemlji ("bliže smo ili dalje od Sunca"), isti p-prim dovodi do pogrešnog objašnjenja.

Prepoznati p-primovi u [3]:

### **1) Povećanje uzroka povećava učinak (više je više):**

Učenici su kod pokusa s optičkom rešetkom očekivali više maksimuma nego u pokusu s dvije pukotine jer rešetka ima više pukotina. Ako dvije pukotine stvaraju mnogo maksimuma, onda će više pukotina stvoriti još više maksimuma.

### **2) Jedan uzrok proizvodi jedan učinak(1:1)**

Učenici koji su očekivali pojavu dvije svijetle točke kod pokusa s dvije pukotine doživjeli su svaku pukotinu kao uzrok i svaku točku kao pripadni učinak. Isti p-prim je koristio učenik koji je za rešetku od 300 zareza/mm očekivao 300 maksimuma.

### **3) Slamanje**

Ovaj p-prim se aktivirao kod učenika kad su trebali objasniti nastanak maksimuma kad je svjetlost nailazila na prepreku. Prepreke između pukotina kod pokusa s interferencijom su uzrok slamanja svjetlosti. Svjetlost je slomljena jer vidimo rupe u "liniji

svjetlosti”, koju su neki učenici spominjali. Da prepreka ne postoji, vidjeli bismo neisprekidanu liniju.

#### **4) Blokiranje**

Učenici su kod pokusa s ogibom predvidjeli da će kod uske pukotine vidjeti samo usku liniju na zastoru jer cijeli laserski snop neće moći proći kroz pukotinu zato što je širi od nje. Slično razmišljanje su koristili i kod optičke rešetke; prepreke između pukotina sprječavaju prolazak svjetlosti, zato dobivamo tamna područja.

Uz navedene p-primove, prepoznati su i drugi resursi:

##### **1) Dva izvora su potrebna za nastajanje interferencijske slike i svaka pukotina je jedan točkasti izvor**

Ovaj resurs je ispravan kad se koristi za objašnjavanje interferencije na dvije uske pukotine ili optičkoj rešetki, no mnogi učenici su ovaj resurs koristili i kod pokusa s ogibom na jednoj pukotini. Tu je nastao problem jer nisu mogli objasniti kako nastaje ogibni uzorak iz samo jednog izvora.

##### **2) Resursi iz geometrijske optike**

Neki učenici su pokušali objasniti pojavu maksimuma višeg reda pomoću loma i odbijanja svjetlosti. Svjetlost je promijenila smjer širenja, a to se može dogoditi pomoću loma ili odbijanja svjetlosnih zraka.

##### **3) Resursi iz mehaničkih valova**

Mnogi učenici su koristili interferenciju mehaničkih valova kao osnovu za objašnjavanje nastajanje interferencijske slike, služeći se „brjegovima“ i „dolovima“ vala i što se događa kad se oni sreću.

##### **4) Epistemološki resursi (znanje dolazi isključivo od autoriteta / znanje se konstruira)**

Učenici su se znali prilikom objašnjavanja referirati na ono što su čuli i vidjeli na nastavi, oslanjajući se na „znanje dolazi od autoriteta“. Neki su pokušali svoje objašnjenje formirati u tom trenutku i time pokazali da se oslanjaju na epistemološki resurs „znanje se konstruira“.

## 5 Oprema i aparatura potrebna za izvođenje pokusa iz valne optike

Da bismo izvodili pokuse iz valne optike potrebna nam je određena oprema i aparatura. Većina opreme korištene za pokuse nabavljena je u okviru projekta INVESTIGATE. Dio pukotina i rešetki izrađen je za potrebe projekta tiskanjem na posebne folije. Posebnost tako izrađenih pukotina, parova pukotina i optičkih rešetki bila je mala širina pukotina u odnosu na komercijalno dostupne pukotine za školske pokuse, što je omogućilo smanjivanje uočljivih ogibnih efekata kod npr. interferencijske slike u Youngovom pokusu u odnosu na komercijalne pukotine.

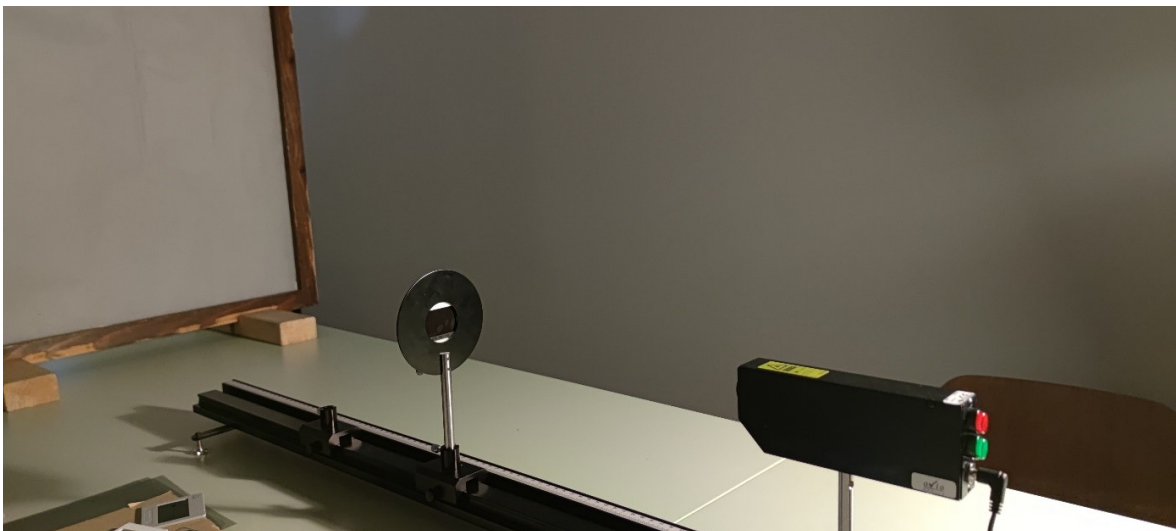


Slika 5.1: Set opreme nabavljene u okviru projekta INVESTIGATE



Slika 5.2: Sadržaj jednog seta

Kao izvore svjetlosti u opservacijskim pokusima koristili smo lasere crvene svjetlosti i zelene svjetlosti, izvor bijele svjetlosti i grafoskop. U istraživačkim pokusima, učenici na raspolaganju imaju crveni laser i izvor bijele svjetlosti. Osim navedenog, koristili smo i polarizatore. Poslužili smo se i s nekim svakidašnjim predmetima, kao npr. spajalicama. I naravno, trebao nam je zastor na kojem ćemo promatrati ogibne i slike interferencije. Da bi smo sve te elemente mogli postaviti treba nam i optička klupa. Postav nekih opservacijskih pokusa prikazan je sljedećoj slici.

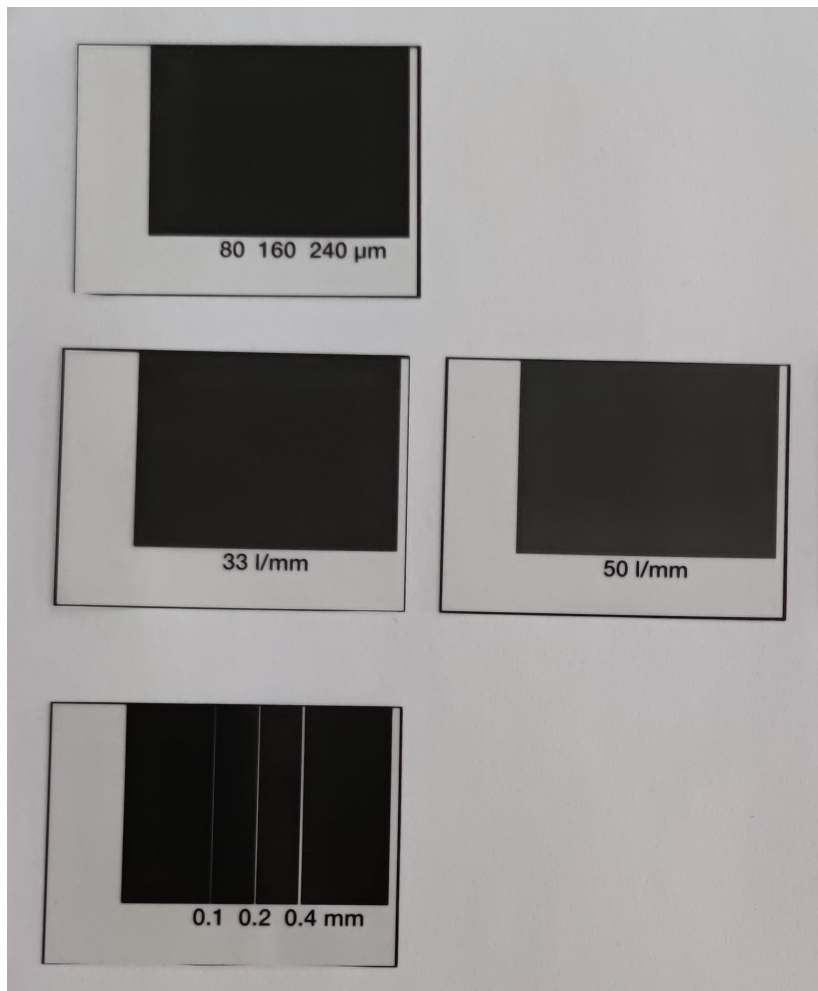


Slika 5.3: Postav opservacijskog pokusa za interferenciju i ogib

Ponekad se moramo poslužiti i nekim drugim predmetima da složimo elemente koji su nam potrebni u određenom pokusu. Konkretno, nama je trebala drvena klupica (slika 5.4) koja je poslužila da se aparatura podigne u nekim pokusima.



Slika 5.4: Postav pokusa za rasap bijele svjetlosti na optičkoj rešetki



Slika 5.5: Slajdovi s pukotinama i optičkim rešetkama koje smo koristili u istraživačkim pokusima

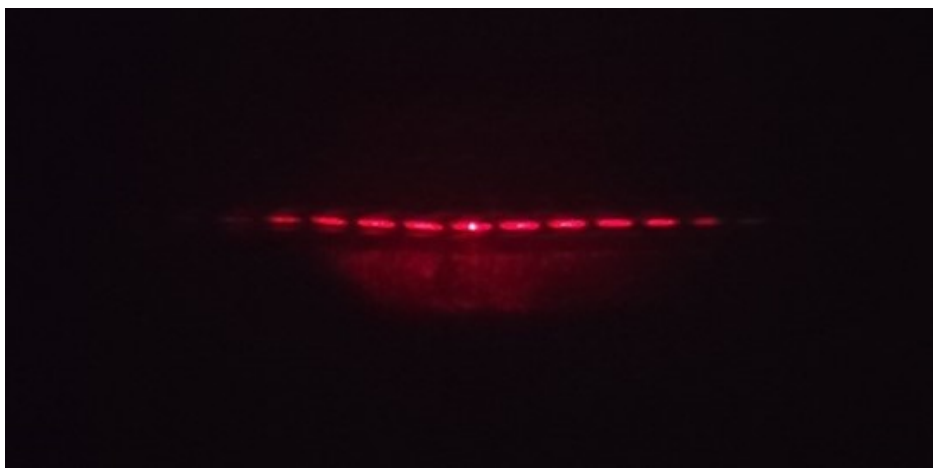
## 6 Učenički istraživački pokusi iz valne optike

### 6.1 Interferencija na dvije pukotine (Youngov pokus) - istraživački pokus

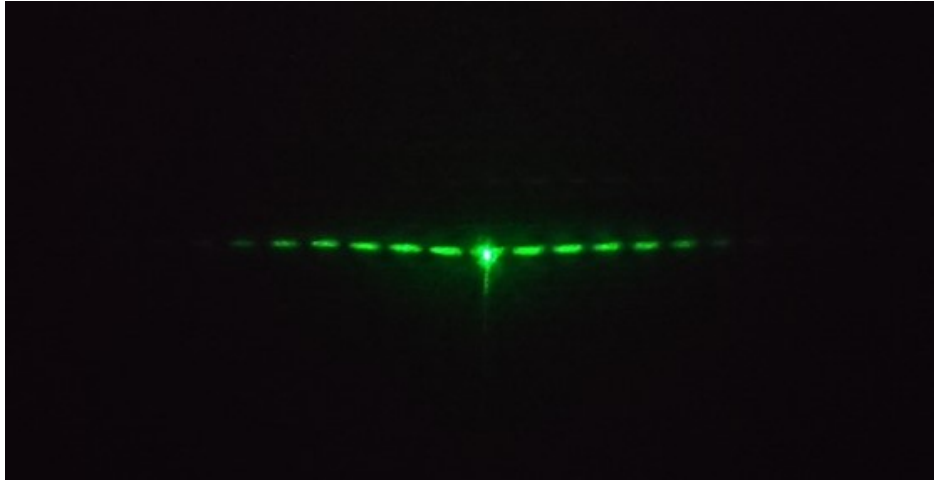
Pokus s dvije pukotine, tzv. Youngov pokus, je pokus u kojem se svjetlost pušta kroz dvije vrlo uske pukotine. Pri izlasku iz pukotina formiraju se dva nova kružna vala koja će međusobno interferirati i u određenim se područjima pojačavati, a u drugima poništavati. Širine pukotina su toliko male da ih možemo smatrati točkastim izvorima svjetlosti. Ovaj pokus se u uvodnom dijelu sata izvodi kao opservacijski pokus jer se učenici, najvjerojatnije, po prvi put susreću s interferencijom svjetlosnih valova. U središnjem dijelu sata se istražuje o čemu ovisi razmak između pruga (maksimuma) kao istraživački pokus. Prije samog istraživačkog pitanja, može se raspraviti s učenicima o kojim bi veličinama razmak između pruga mogao ovisiti.

**Istraživačko pitanje 1 (IP1): Kako razmak među prugama ovisi o valnoj duljini svjetlosti? (istražujemo frontalno)**

Treba odrediti koje veličine treba držati konstantnima. Mi smo odabrali udaljenost pukotine od zastora  $a = 150 \text{ cm}$  i razmak među pukotinama  $d = 80 \mu\text{m}$ . Prvo smo pukotine obasjali crvenom, a potom zelenom svjetlošću.

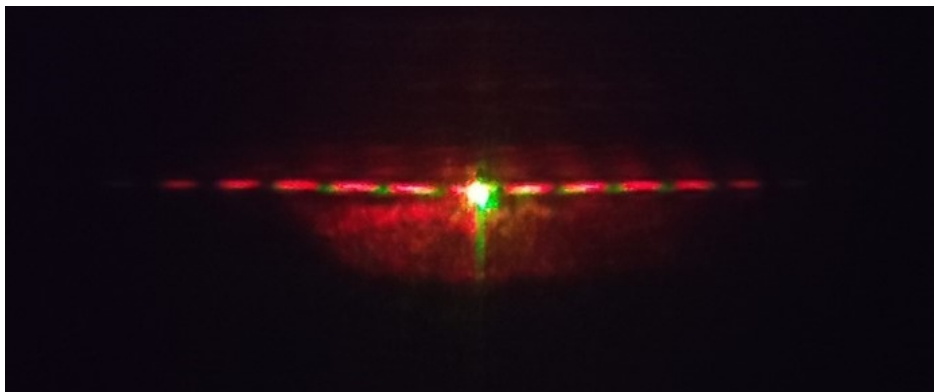


Slika 6.1: Interferencijska slika crvene svjetlosti,  $d = 80 \mu\text{m}$ ,  $a = 150 \text{ cm}$



Slika 6.2: Interferencijska slika zelene svjetlosti,  $d = 80 \mu m$ ,  $a = 150 cm$

Ako se slike bolje pogledaju, primijetit ćemo da su kod crvene svjetlosti maksimumi širi, što znači da će minimumi biti udaljeniji od središta zastora, a ujedno i međusobno udaljeniji. Radi lakšeg opažanja razlika, pustili smo obje svjetlosti zajedno kroz pukotine.



Slika 6.3: Interferencijska slika crvene i zelene svjetlosti,  $d = 80 \mu m$ ,  $a = 150 cm$

Učenici pišu opažanja u bilježnicu: **razmak među prugama je veći za svjetlost veće valne duljine**. Kako ne mogu na temelju samog opažanja zaključiti o funkcionalnoj ovisnosti, nastavnik ih upućuje na to da su mjerenja ukazala na proporcionalnost između razmaka maksimuma i valne duljine svjetlosti.

Učenici se nakon ovog dijela pokusa dijele u manje skupine i nastavljaju istraživati samostalno.

**IP2: Kako razmak među prugama ovisi o razmaku među pukotinama?**

**IP3: Kako razmak među prugama ovisi o udaljenosti pukotina od zastora?**

U nastavku slijedi radni listić koji će voditi učenike kroz samostalno istraživanje.



## LISTIĆ 2: ISTRAŽIVANJE INTERFERENCIJE NA DVIJE PUKOTINE

### POKUS 1.

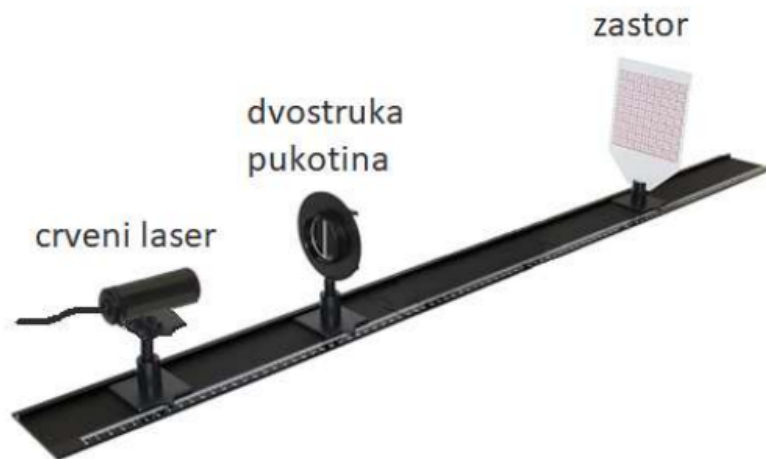
**IP1: Kako razmak među prugama ( $s$ ) ovisi o valnoj duljini svjetlosti ( $\lambda$ )?**

Raspravite kako ćete provesti to istraživanje te zapišite što ćete mijenjati, što mjeriti, a što držati stalnim.

Pokus će napraviti nastavnik, a vi zapišite zaključak.

### POKUS 2.

Postavite laser, dvostruku pukotinu i zastor na optičku klupu kako je prikazano na slici.



**IP2: Kako razmak među prugama ( $s$ ) ovisi o udaljenosti pukotina od zastora ( $a$ )?**

Raspravite kako ćete provesti to istraživanje te zapišite što ćete mijenjati, što mjeriti, a što držati stalnim.

HRZZ IP-2018-01-9085 INVESTIGATE – sva prava pridržana

Slika 6.4: Prva stranica radnog listića preuzeta s [4]

Izvedite pokus s 3 mjerenja i zapišite ih u tablicu. (Preporučamo da za udaljenosti zastora od pukotina uzmete 1 m, 0,5 m i 0,25 m. Odaberite pukotine s najmanjim razmakom  $d$ .)

| $a/m$ | $s/mm$ |
|-------|--------|
|       |        |
|       |        |
|       |        |

Što možete zaključiti na temelju vaših mjerenja? U kakvoj su matematičkoj vezi mjerene veličine?

### POKUS 3.

#### IP3: Kako razmak među prugama ( $s$ ) ovisi o razmaku među pukotinama ( $d$ )?

Raspravite kako ćete provesti to istraživanje te zapišite što ćete mijenjati, što ćete mjeriti i što držati stalnim.

Provedite pokus i zapišite veličine i mjerenja u tablicu. (Radi bolje vidljivosti postavite zastor najdalje što možete na optičkoj klupi.)

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Što možete zaključiti na temelju vaših mjerenja? U kakvoj su matematičkoj vezi mjerene veličine?

### MATEMATIČKA OVISNOST

Napišite izraz za razmak ( $s$ ) među prugama na temelju svih provedenih pokusa i provjerite ga za jedno od svojih mjerenja.

HRZZ IP-2018-01-9085 INVESTIGATE – sva prava pridržana

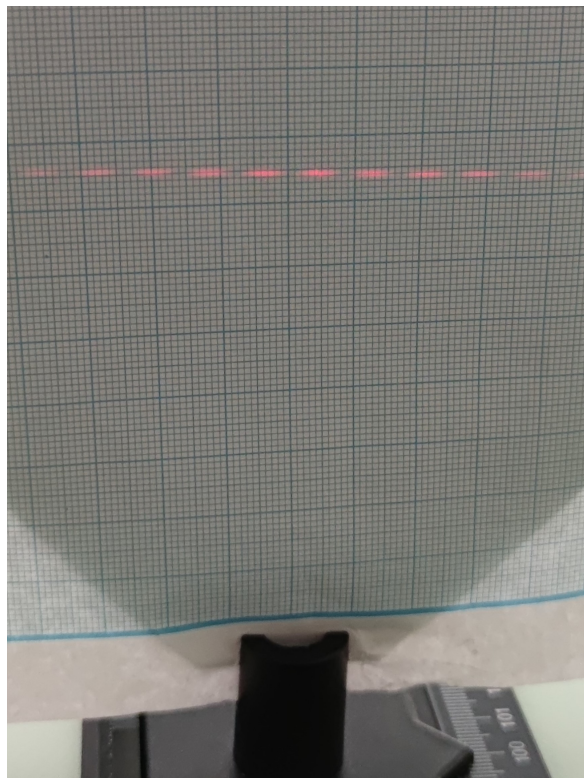
Slika 6.5: Druga stranica radnog listića preuzeta s [4]

Prije svega, učenici moraju postaviti pokus. Postav učeničkog pokusa prikazan je na slici 6.6.

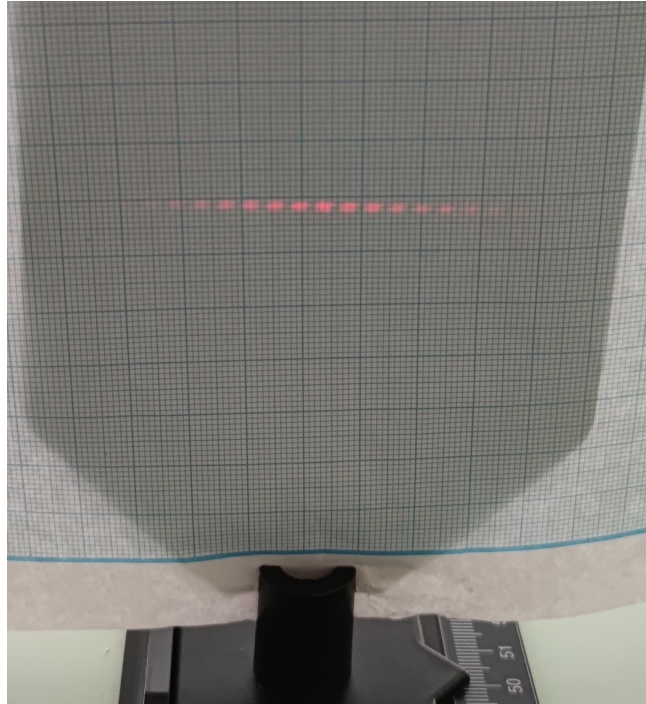


Slika 6.6: Postav učeničkog istraživačkog pokusa za istraživanje interferencije i ogiba

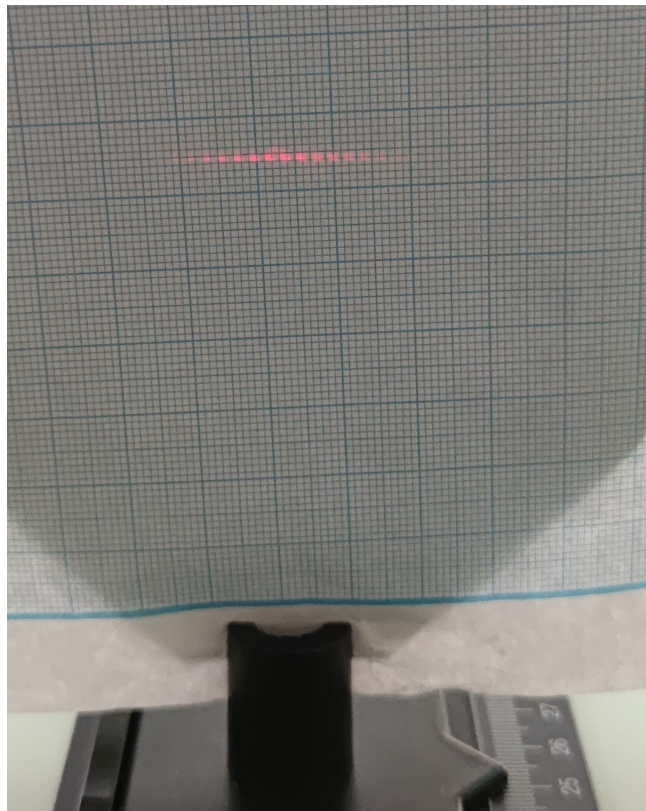
Za **IP2** učenici odabiru jedan par pukotina (mi smo koristili pukotine razmaknute za  $80 \mu m$ ) i mijenjaju udaljenost zastora od pukotine, mjere udaljenost između maksimuma i podatke zapisuju u tablicu na listiću. Slike zastora koje smo dobili su prikazane na sljedećim slikama.



Slika 6.7: Interferencijska slika,  $d = 80 \mu m$ ,  $a = 100 cm$



Slika 6.8: Interferencijska slika,  $d = 80 \mu m$ ,  $a = 50 cm$



Slika 6.9: Interferencijska slika,  $d = 80 \mu m$ ,  $a = 25 cm$

Korisno je na zastor staviti milimetarski papir da se lakše može odrediti udaljenost između maksimuma. Na sljedećoj slici je prikazana tablica s podacima mjerenja.

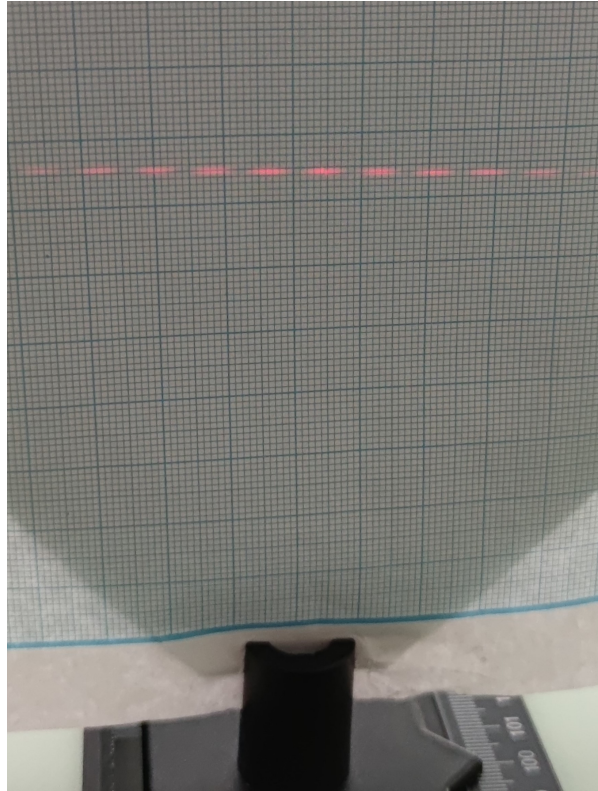
| $a/m$ | $s/mm$ |
|-------|--------|
| 1     | 8      |
| 0,5   | 4      |
| 0,25  | 2      |

Slika 6.10: IP2 - podaci mjerenja

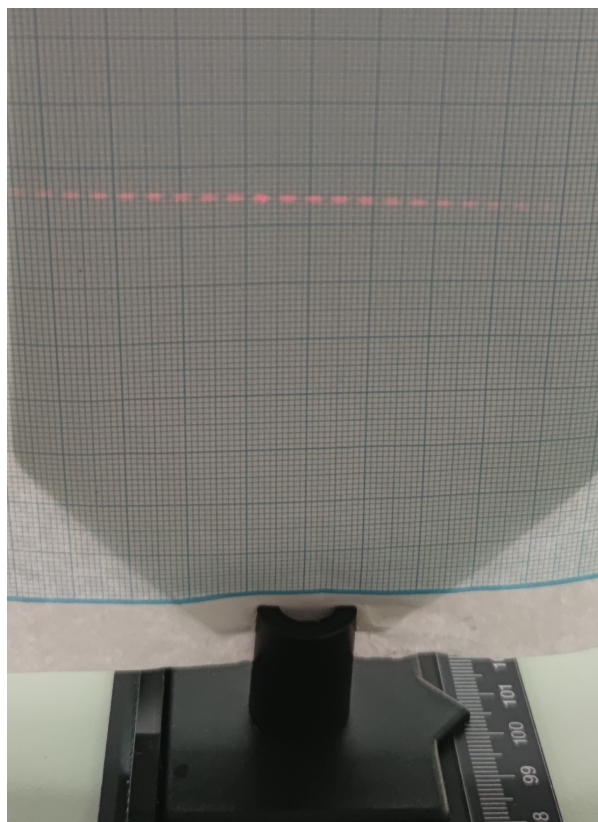
Iz izmjerenih podataka učenici zaključuju da su udaljenost između zastora i pukotina i razmak između susjednih maksimuma proporcionalne veličine.

$$s \sim a \tag{6.1}$$

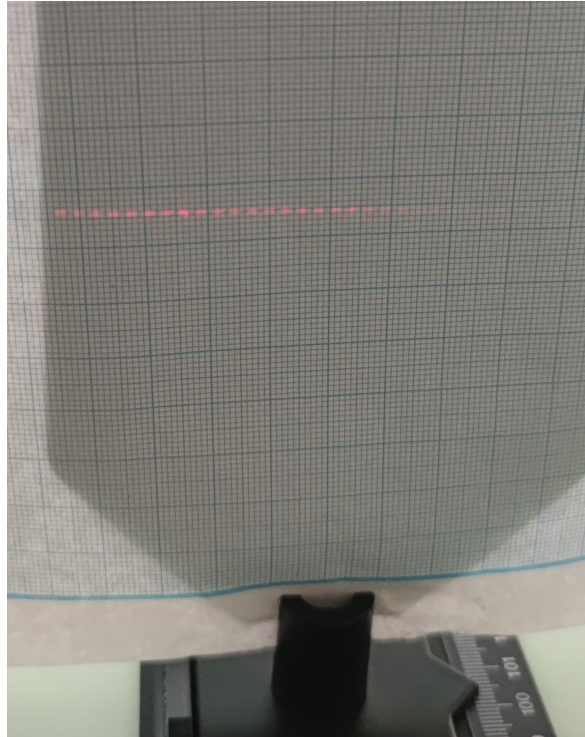
Za **IP3** učenici odabiru jednu udaljenost  $a$  (mi smo uzeli  $a = 100cm$ ) i mjere udaljenosti između maksimuma za više parova pukotina različitih međusobnih razmaka. Slike zastora prikazane su na sljedećim slikama.



Slika 6.11: Interferencijska slika,  $a = 100 \text{ cm}$ ,  $d = 80 \mu\text{m}$



Slika 6.12: Interferencijska slika,  $a = 100 \text{ cm}$ ,  $d = 160 \mu\text{m}$



Slika 6.13: Interferencijska slika,  $a = 100 \text{ cm}$ ,  $d = 240 \mu\text{m}$

Na sljedećoj slici je prikazana tablica s podacima mjerenja.

| $d/\mu\text{m}$ | $s/\text{mm}$ |
|-----------------|---------------|
| 80              | 8             |
| 160             | 4             |
| 240             | 2             |

Slika 6.14: IP3 - podaci mjerenja

Učenici iz podataka zaključuju da su razmak između maksimuma i razmak između pukotina obrnuto proporcionalne veličine.

$$s \sim \frac{1}{d} \quad (6.2)$$

Na kraju učenici zapisuju matematičku ovisnost razmaka među maksimumima na temelju provedenih mjerenja.

$$s = \frac{\lambda a}{d} \quad (6.3)$$

## 6.2 Interferencija na optičkoj rešetki - istraživački pokus

Optička rešetka se obrađuje nakon interferencije na dvije pukotine i nakon izvoda uvjeta za konstruktivnu i destruktivnu interferenciju.

U uvodnom dijelu se pokazuje opservacijski pokus gdje učenici samo opažaju pojavu interferencije na optičkoj rešetki i komentiraju svoja opažanja. Pošto su naučili uvjete interferencije, učenici sada mogu komentirati kako su maksimumi nastali. Može ih se pitati po čemu se ova interferencijska slika razlikuje od one kod pokusa s dvije pukotine i zašto do tih razlika dolazi (jači intenzitet maksimuma i veći razmak među njima). Kod optičke rešetke se uvode pojmovi središnjeg maksimuma ( $k = 0$ ) i maksimuma višeg reda ( $k = 1, 2, \dots$ ). Također se uvodi konstanta rešetke iz koje učenici mogu računati koliki je razmak između susjednih pukotina. Nadalje, za razliku od pokusa s dvije pukotine, gdje smo gledali razmak među maksimumima, rešetku ćemo opisati pomoću kuta  $\alpha$  pod kojim vidimo  $k$ -ti maksimum, jer je taj kut isti na svim udaljenostima zastora, a razmak među maksimumima nije.

U središnjem dijelu se mogu postaviti slična istraživačka pitanja kao i kod pokusa s dvije pukotine.

**IP1: Kako se dobivena slika mijenja pri promjeni konstante rešetke i udaljenosti do zastora?**

Učenici istraživanja opet mogu provoditi u malim grupama. U nastavku su radni listići koji će voditi učenike kroz istraživanje.



#### LISTIĆ 4: OPTIČKA REŠETKA

**IP1: Kako se dobivena slika mijenja pri promjeni konstante rešetke i udaljenosti do zastora?**

Postavite laser i optičku rešetku na optičku klupu i postignite interferencijski uzorak na zastoru.



a) Kvalitativno istražite kako se razmak maksimuma mijenja s udaljenosti ( $a$ ) rešetke do zastora.

Kratko opišite pokus (što mijenjate, a što držite stalnim) i zapišite zaključak.

Što se pri promjeni udaljenosti  $a$  događalo s kutom pod kojim se vidio npr. treći maksimum?

Objasnite. Što biste morali izmjeriti da odredite taj kut?

b) Kvalitativno istražite kako se razmak maksimuma mijenja s konstantom rešetke  $d$ .

Kratko opišite pokus (što mijenjate, a što držite stalnim).

HRZZ IP-01-2018-9085 INVESTIGATE – sva prava pridržana

Slika 6.15: Prva stranica radnog listića preuzeta s [4]

| Broj zareza po milimetru | d/mm | Skica pojave |
|--------------------------|------|--------------|
|                          |      |              |
|                          |      |              |

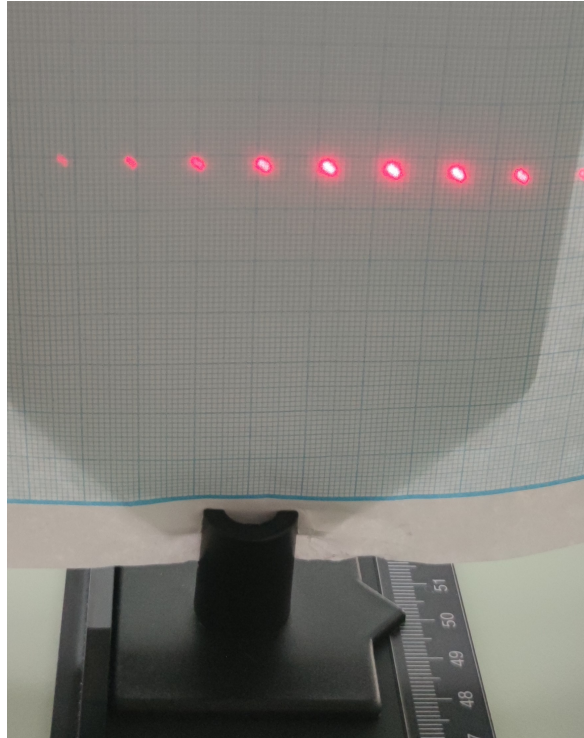
Zapišite zaključak.

HRZZ IP-01-2018-9085 INVESTIGATE – sva prava pridržana

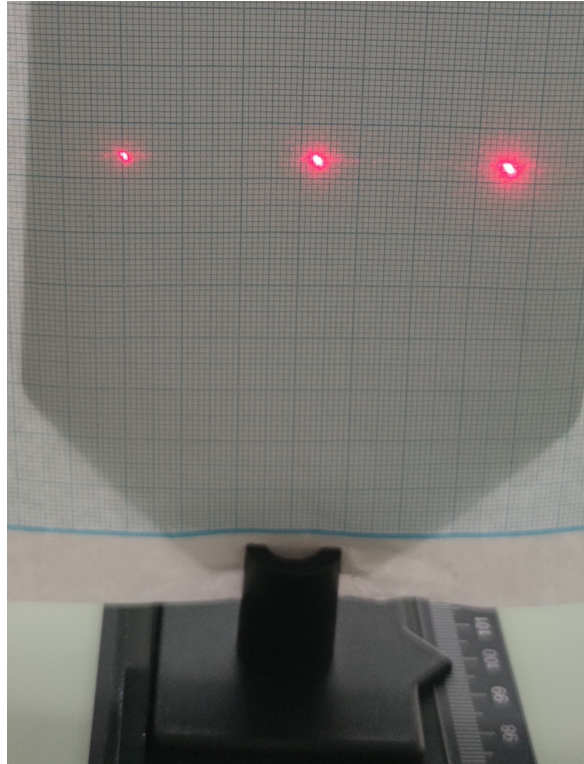
Slika 6.16: Druga stranica radnog listića preuzeta s [4]

Mi smo za prvi dio pitanja istraživali kako udaljenost zastora od rešetke utječe na razmak među maksimumima. Učenici odabiru jednu optičku rešetku (mi smo odabrali rešetku s  $33\text{ l/mm}$ , što daje  $d = 30,3\ \mu\text{m}$ ) i mijenjaju  $a$ .

Slike na zastoru su prikazane na sljedećim slikama.



Slika 6.17: Interferencijska slika,  $d = 30,3\ \mu\text{m}$ ,  $a = 50\text{ cm}$



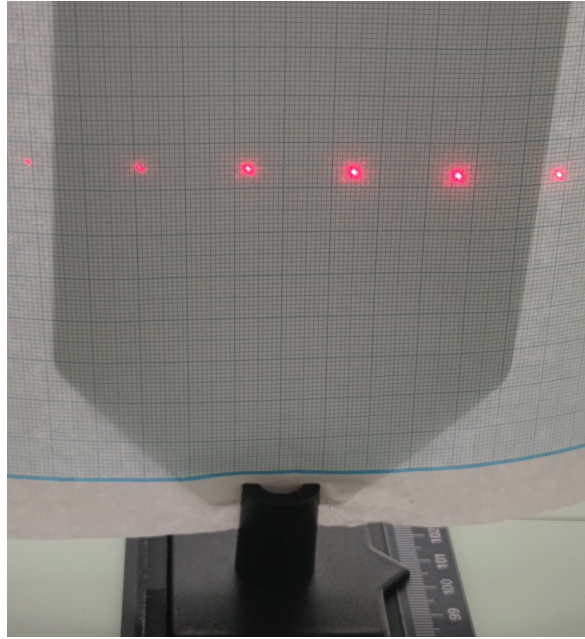
Slika 6.18: Interferencijska slika,  $d = 30,3 \mu m$ ,  $a = 100 \text{ cm}$

Učenci opažaju da porastom udaljenosti između rešetke i zastora maksimumi isto postaju udaljeniji, odnosno kut  $\alpha$  pod kojim se određeni maksimum višeg reda vidi, postaje veći. Ako bismo htjeli odrediti kut  $\alpha$  pod kojim se neki maksimum višeg reda vidi, morali bismo izmjeriti udaljenost između rešetke i zastora i udaljenost između središnjeg i promatranog maksimuma. Tangens tog kuta će biti jednak kvocijentu udaljenosti između maksimuma i udaljenosti između rešetke i zastora:

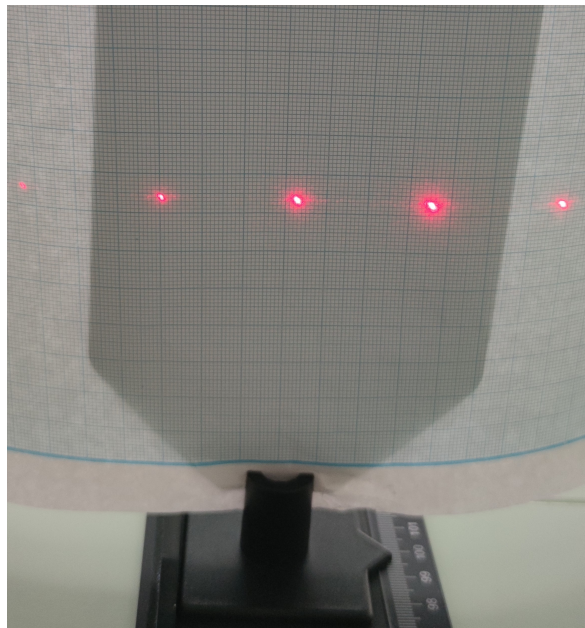
$$\operatorname{tg}(\alpha_k) = \frac{s_k}{a}, \quad (6.4)$$

gdje je  $s_k$  udaljenost od središnjeg i  $k$ -tog maksimuma, a  $\alpha_k$  je kut pod kojim se taj maksimum vidi ( $k = 1, 2, \dots$ ).

Za drugi dio istraživačkog pitanja učenici istražuju kako će udaljenost između maksimuma ovisiti o konstanti rešetke. Učenici će udaljenost između pukotina i zastora držati stalnom (mi smo odabrali  $a = 100 \text{ cm}$ ) i koristit će optičke rešetke različitih konstanti rešetke (mi smo koristili optičke rešetke od  $33 \text{ l/mm}$ , što daje  $d = 30,3 \mu m$  i  $50 \text{ l/mm}$  što daje  $d = 20 \mu m$ ). Slike zastora su prikazane na sljedećim slikama.



Slika 6.19: Interferencijska slika,  $a = 100 \text{ cm}$ ,  $d = 30,3 \mu\text{m}$



Slika 6.20: Interferencijska slika,  $a = 100 \text{ cm}$ ,  $d = 20 \mu\text{m}$

Učenci opažaju da će optička rešetka veće konstante rešetke, odnosno s manjim razmakom između susjednih pukotina dati maksimume s većim međusobnim razmakom. Drugim riječima, što je razmak između susjednih pukotina manji, to će kut  $\alpha$  pod kojim se određeni maksimum višeg reda vidi biti veći. Frontalnim interaktivnim izvodom učenici uz vodstvo nastavnika dolaze do uvjeta za maksimum na optičkoj rešetki:

$$d \sin \alpha_k = k\lambda \quad (6.5)$$

odnosno, kut  $\alpha$  pod kojim se vidi  $k$ -ti maksimum ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) će biti veći što je veća valna duljina svjetlosti i što je manji razmak među susjednim pukotinama (što je veća konstanta rešetke).

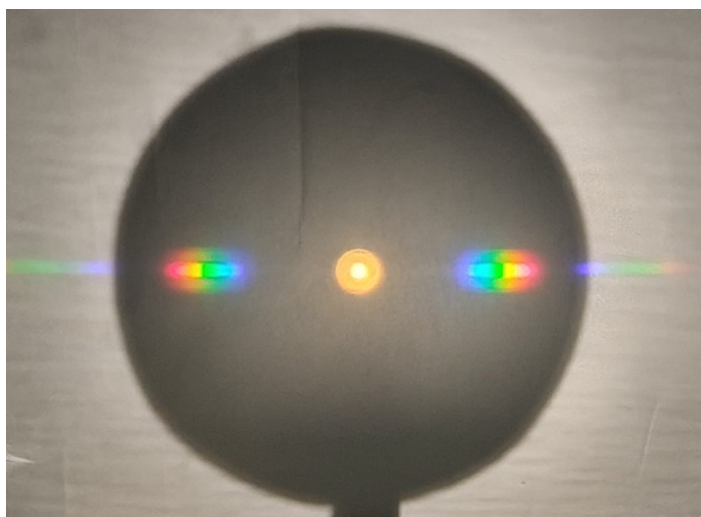
Nakon toga se može postaviti još jedno istraživačko pitanje.

**IP2: Kakva bi se slika dobila ako bismo rešetku obasjali bijelom svjetlošću? Što predviđate?**

Učenici bi mogli na temelju prijašnjih zaključaka i spoznaje da se bijela svjetlost sastoji od valnih duljina svih boja, pretpostaviti da će na zastoru vidjeti rasap bijele svjetlosti na boje.

**Aplikacijski pokus:** Učenike uputimo da stave upaljenu svjetiljku jednog mobitela na klupu, te da naizmjenice promatraju tu svjetiljku držeći optičku rešetku u ruci te da skiciraju i opišu dobivenu sliku. Ako ostane vremena, pokus se može izvesti i frontalno. Postav ovog pokusa prikazan je na slici 5.4.

Na slici 5.4 desno se nalazi izvor bijele svjetlosti, između rešetke i izvora svjetlosti je sabirna leća koja služi da se svjetlost fokusira na optičku rešetku. U ovom pokusu, mi smo koristili leću jakosti  $j = 30 \text{ dpt}$  i optičku rešetku s 300 zarezova po mm. Slika na zastoru koju smo dobili prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 6.21: Rasap svjetlosti na boje na optičkoj rešetki

Do rasapa bijele svjetlosti na boje dolazi zato što se bijela svjetlost sastoji od valova svih valnih duljina (svih boja). Pošto kut pod kojim se vidi maksimum ovisi o

valnoj duljini svjetlosti, tako dobivamo rasap boja kakav je prikazan na slici. Za kut pod kojim se vidi određeni maksimum vrijedi ista formula (6.5) kao i kod optičke rešetke.

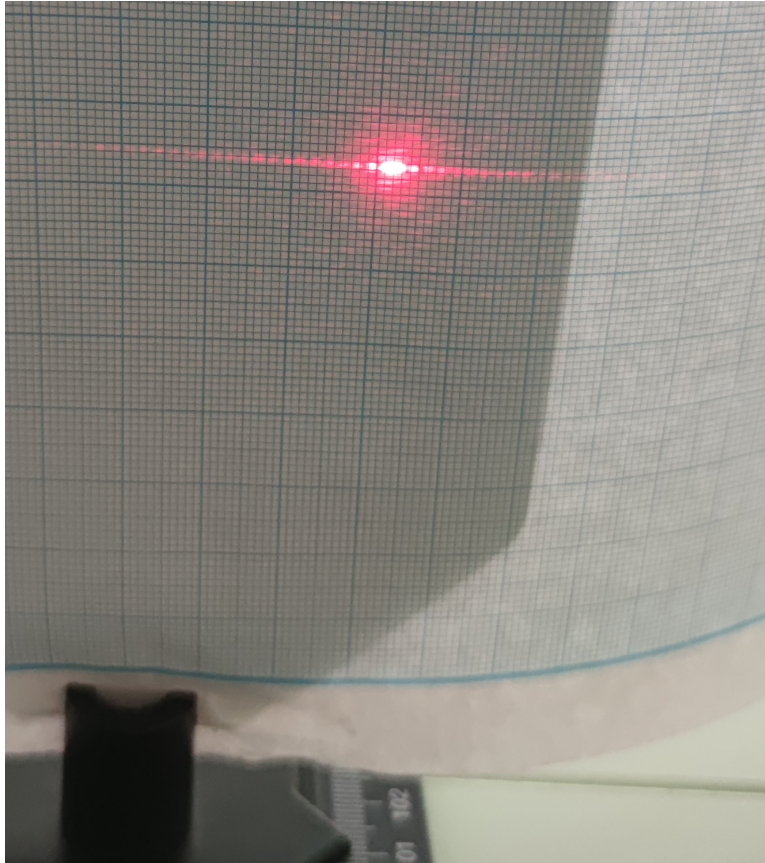
### **6.3 Ogib na pukotini - istraživački pokus**

Učenici su do sad vidjeli što se događa kad svjetlost prolazi kroz dvije i kroz mnoštvo pukotina. Pitamo ih što očekuju za jednu pukotinu, primjenjujući geometrijsku optiku. Skiciraju svoja predviđanja u bilježnicu. Uzimamo u obzir da je pukotina manje širine od širine laserskog snopa. Zatim se izvodi opservacijski pokus u kojem puštamo svjetlost kroz usku pukotinu. Učenici skiciraju opažanja, koja se poslije skiciraju na ploči da se lakše uoče razlike između dobivene i očekivane slike. Uvodimo pojam ogiba i ogibne slike i s učenicima komentiramo njezine karakteristike. Ogibna slika prepoznatljiva je po širokom središnjem maksimumu, koji je većeg intenziteta od maksimuma višeg reda.

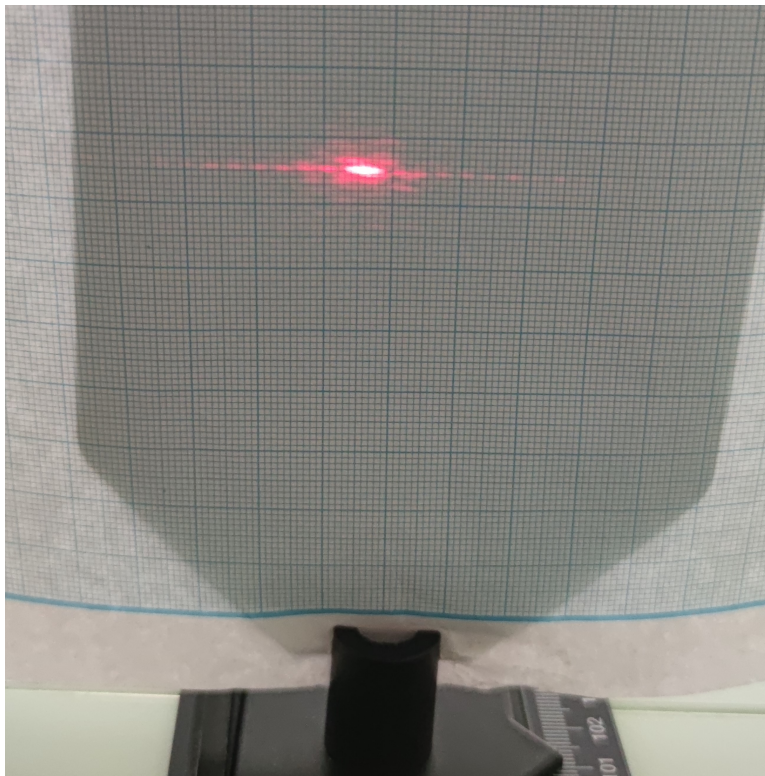
Nakon objašnjenja kako ogib nastaje, slijedi istraživačko pitanje.

**IP: Kako se širina središnjeg ogibnog maksimuma mijenja s promjenom širine pukotine?**

Učenici daju pretpostavke i najčešće očekuju da će sužavanje pukotine dati uži središnji maksimum. Učenici ponovno mogu raditi u grupama. Učenici odabiru udaljenost zastora od pukotine (mi smo opet uzeli  $a = 100 \text{ cm}$ ) i koriste pukotine različitih širina.

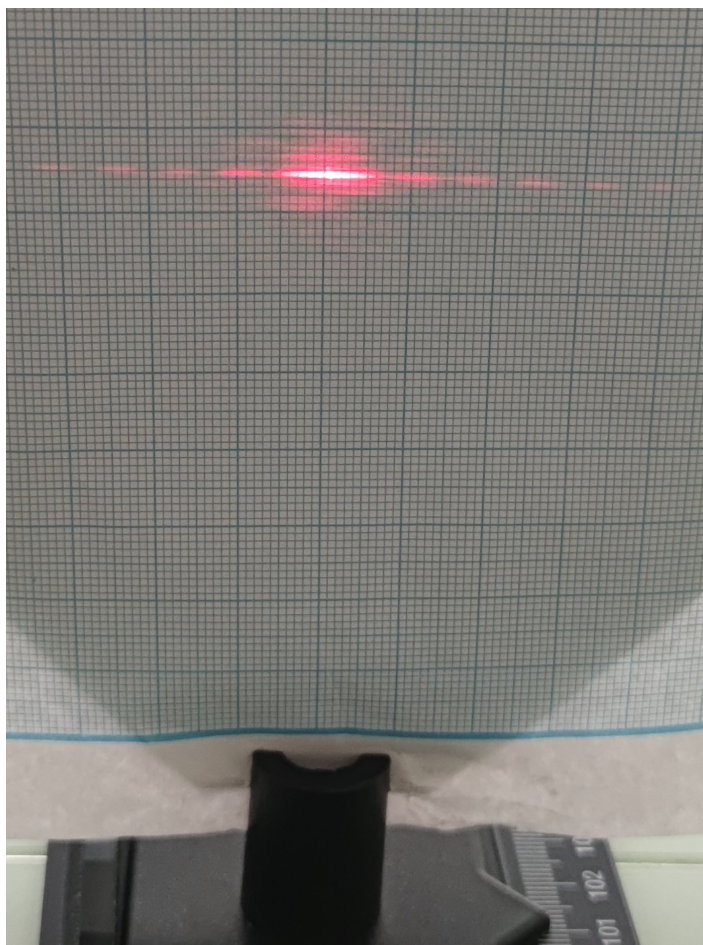


Slika 6.22: Ogibna slika na pukotini širine  $d = 0,4mm$



Slika 6.23: Ogibna slika na pukotini širine  $d = 0,2mm$





Slika 6.24: Ogibna slika na pukotini širine  $d = 0,1\text{mm}$

Iz ovog pokusa može se zaključiti da sužavanjem pukotine dobivamo širi središnji maksimum, što je upravo suprotno od moguće pretpostavke. Prvi maksimum se tada vidi pod sve većim kutom. Širenje središnjeg maksimuma pri sužavanju pukotine možemo objasniti time da pukotina postaje sve sličnija točkastom izvoru kako se sužava.

## 6.4 Polarizacija

Pokus s polarizacijom svjetlosti izvodio bi se frontalno kao opservacijski pokus. Prije pokusa upoznajemo učenike s polarizatorima. Trebaju nam dva polarizatora, maleni predmet kao što je spajalica (ili nešto slično) i izvor svjetlosti kao što je grafoskop kako bi pokus vidio cijeli razred. Prvo samo uključimo grafoskop, na njega stavimo spajalicu i projektiramo svjetlost na zid ili ploču.

Sljedeći korak je preko stakla staviti prvi polarizator i zarotirati ga za 360 stupnjeva. Isto možemo učiniti i s drugim polarizatorom.

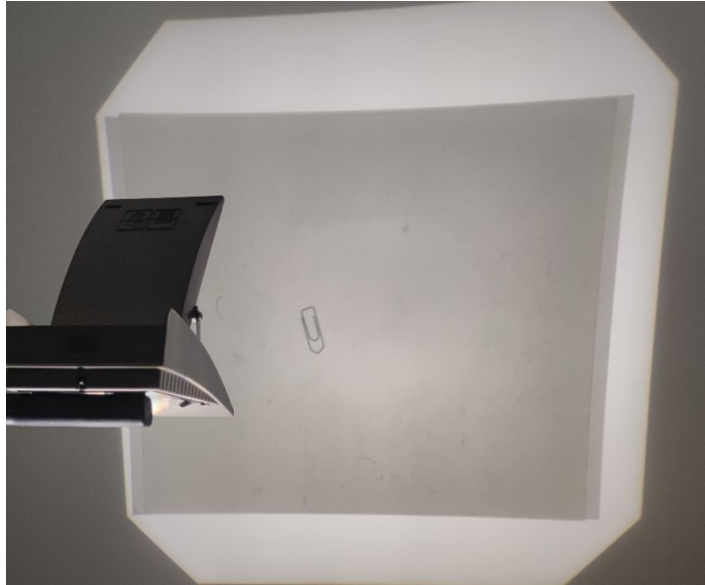


Slika 6.25: Svjetlost grafoskopa kroz polarizator položen vertikalno



Slika 6.26: Svjetlost grafoskopa kroz polarizator položen horizontalno

Kažemo da je svjetlost koja izvire iz žarulje u grafoskopu nepolarizirana. Svjetlost koja prolazi kroz polarizator bit će slabijeg intenziteta nego izvorna svjetlost, a intenzitet će biti isti bez obzira na orijentaciju polarizatora. To zapisujemo na ploču. Sad se možemo pitati je li svjetlost koja je prošla kroz polarizator i dalje nepolarizirana. Potom stavimo i drugi polarizator preko prvog da budu jednako orijentirani.

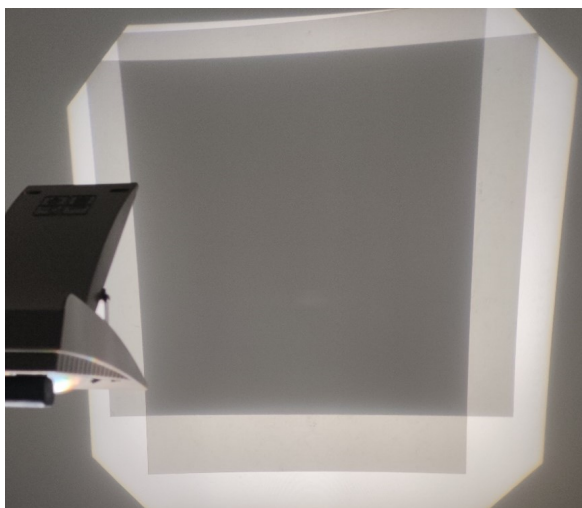


Slika 6.27: Svjetlost grafoskopa kroz dva jednako orijentirana polarizatora

Kad svjetlost prolazi kroz dva polarizatora koja su jednako orijentirana, nema promjene u intenzitetu s obzirom na svjetlost koja prolazi kroz samo jedan polarizator. Dalje možemo rotirati drugi polarizator.



Slika 6.28: Svjetlost grafoskopa kroz dva polarizatora koja su pod kutem manjim od 90 stupnjeva



Slika 6.29: Svjetlost grafoskopa kroz dva okomita polarizatora

Ako polarizatori, odnosno njihove osi polarizacije, zatvaraju kut manji od 90 stupnjeva, opažamo smanjeni intenzitet prolazne svjetlosti. Kako se približavamo kutu od 90 stupnjeva intenzitet je sve manji i manji, a kad polarizatori postanu međusobno okomiti, svjetlost iščezava. Ako nastavimo rotirati drugi polarizator, intenzitet će se povećavati sve dok opet ravnine polarizacije ne budu paralelne.

Učenici zaključuju da svjetlost nakon polarizacijskog filtra nije više nepolarizirana, jer inače rotacija drugog filtra ne bi utjecala na njen intenzitet, kao što je bio slučaj u prvom dijelu pokusa. Ovaj pokus se može izvesti i bez grafoskopa, ali onda pokus ne može vidjeti cijeli razred. Na stol možemo staviti spajalicu ili neku sliku i staviti polarizatore preko njih i napraviti isti postupak.

### ***6.5 Polarizacija reflektirane svjetlosti - istraživački pokus***

Na sljedećoj slici je radni listić koji će voditi učenike kroz istraživanje polarizacije reflektirane svjetlosti.

## LISTIĆ 7: ISTRAŽIVANJE POLARIZACIJE REFLEKTIRANE SVJETLOSTI

**Zašto polarizirajuće naočale smanjuju odbljesak s nekih površina?**

Jedno je moguće objašnjenje (hipoteza) da je svjetlost koja se reflektira od određenih površina polarizirana.

Razmislite i opišite kakvim biste pokusom provjerili tu hipotezu.

**POKUS:**

**Koji ishod pokusa očekujete, ako je hipoteza ispravna?**

**PREDVIĐANJE:**

**Provedite pokuse u skupinama i zapišite svoja opažanja.**

**OPAŽANJA:**

**Usporedite predviđanja i opažanja i donesite zaključak o valjanosti hipoteze.**

**ZAKLJUČAK:**

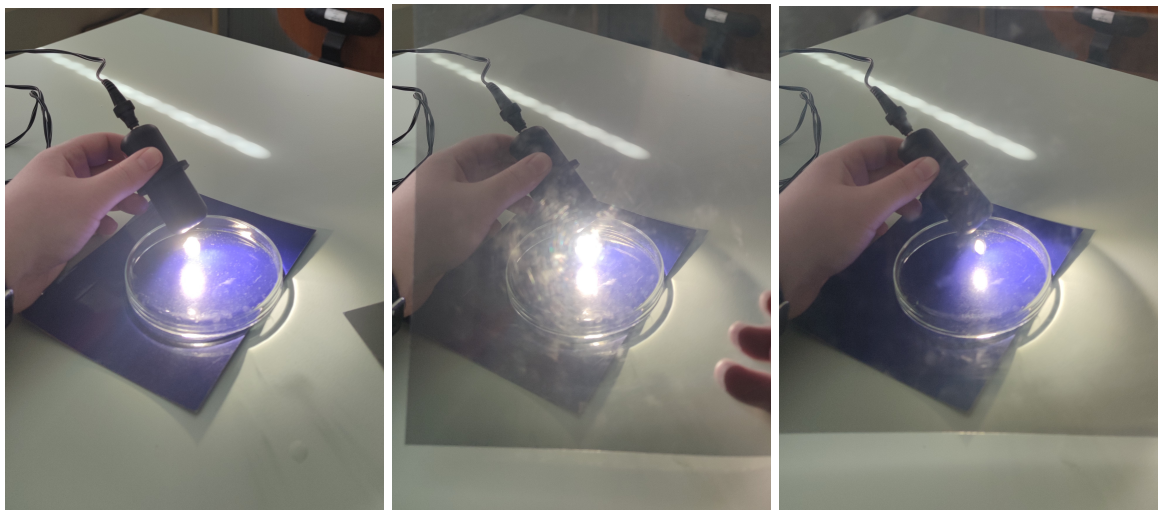
Slika 6.30: Radni listić za istraživanje polarizacije reflektirane svjetlosti

Učenici osmišljavaju pokus kojom bi provjerili hipotezu da je svjetlost reflektirana od određenih površina polarizirana. Ako je svjetlost reflektirana od neke površine polarizirana, onda će se pri rotaciji polarizatora kroz koji se refleksija promatra intenzitet reflektirane svjetlosti mijenjati.

Učenici mogu provjeriti hipotezu za više različitih površina. Ishodi pokusa su prikazani na sljedećim setovima slika gdje prva pokazuje odsjaj gledan bez polarizatora, druga odsjaj gledan kroz polarizator položen vertikalno i treća odsjaj gledan kroz polarizator položen horizontalno.



Slika 6.31: Reflektirana svjetlost na vodi



Slika 6.32: Reflektirana svjetlost na staklu



Slika 6.33: Reflektirana svjetlost na kartonu



Slika 6.34: Reflektirana svjetlost na limenom poklopcu



Slika 6.35: Reflektirana svjetlost na aluminijskoj foliji

Učenici opažaju da se promjena intenziteta zbiva kod refleksije svjetlosti na vodi, staklu i kartonu i zaključuju da je reflektirana svjetlosti s tih površina polarizirana. Za limeni poklopac i aluminijsku foliju to nije slučaj pa učenici zaključuju da reflektirana svjetlost od metalne površine neće biti polarizirana, a od ostalih hoće.

## 7 Zaključak

Valna optika je, kao što smo vidjeli, puna apstraktnih koncepata i ne čudi što mnogi učenici i studenti pa čak i nastavnici, sa sobom vuku neka kriva mišljenja koja se tiču tih koncepata. Važno je, prije same valne optike, učenike dobro upoznati s valnim svojstvima i principima koji vrijede na primjerima mehaničkih valova. Kasnije će ta znanja i vještine primjenjivati u nekim drugim situacijama i zadacima, u nastavnim jedinicama koje slijede. Korisno je da učenici sami istraže ovisnost relevantnih veličina jer će tako, ne samo bolje upamtiti, nego i razumjeti relacije koje ih povezuju. Uostalom, ako sami budu uključeni u izvođenje pokusa i direktno dožive pojave valne optike i njihove tipične uzorke, u budućnosti će ih moći s lakoćom prepoznati, i ako primjene znanje koje su stekli ranije, objasniti kako koji nastaje.

Zahvaljujući projektu IP-2018-01-9085 (INVESTIGATE) mnoge škole su mogle pribaviti jeftinu, ali opet dovoljno kvalitetnu opremu potrebnu za izvođenje pokusa koje smo naveli ranije. Osim toga, razrađene su pripreme za nastavne sate i nastavni materijali koji obrađuju valnu optiku i one su dostupne svima na [1].

Premda još mnogo škola nema adekvatnu opremu, možemo se nadati da će u budućnosti biti još sličnih projekata i da će u školama prevladati nastava koja se zasniva na istraživačkom pristupu. Jasno je da je takva nastava bolja i učinkovitija, a osim toga i zanimljivija učenicima. Istraživački usmjerena nastava potiče interakciju između nastavnika i učenika, ali i među učenicima. Osim što učenici razvijaju kritičko mišljenje i znanstveno zaključivanje, uče kako surađivati u timskom okruženju. Učenici postaju aktivni sudionici u nastavnom procesu i osjećaju svoj doprinos u rješavanju problema. To je sigurno bolji oblik nastave od klasičnog, predavačkog oblika nastave, gdje učenici slušaju i vode bilješke. Jedna izreka kaže: "Reci mi i zaboravit ću, pokaži mi i upamtit ću, uključi me i razumjet ću." Nama je cilj da učenici razumiju.

Još jedna lijepa osobina istraživački usmjerene nastave je suradnja nastavnika i učenika. Nastavnik nudi učenicima vodstvo i savjet i zajedno s njima istražuje i želi doći do



zaključka. U takvim se situacijama između nastavnika i učenika ostvaruju pozitivni međuljudski odnosi, a ne treba govoriti da je ugodnije učiti u okruženju u kojem se osjećamo dobro.

## Literatura

- [1] Projekt IP-2018-01-9085 pod nazivom "Utjecaj uključivanja istraživačkih učeničkih pokusa u srednjoškolsku nastavu fizike na razvoj znanstvenog uključivanja i konceptualnog razumijevanja"  
<https://edu.phy.pmf.unizg.hr/hr/projekt/>
- [2] Kurikulum nastavnog predmeta fizika za osnovne škole i gimnazije  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_01\\_10\\_210.html?fbclid=IwAR0ZPpo1NU3Swk1RWFL5zrqDbDGC18pNgqRq0y-K8NvGmqcxbHxqWbwXemc](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html?fbclid=IwAR0ZPpo1NU3Swk1RWFL5zrqDbDGC18pNgqRq0y-K8NvGmqcxbHxqWbwXemc)
- [3] Matejak Cvenić, K.; Ivanjek, L.; Planinić, M.; Sušac, A.; Hopf, M.; Cindrić Brkić, M. Probing High School Students' Understanding of Interference and Diffraction of Light Using Standard Wave Optics Experiments
- [4] Metodičke upute i pripreme, iz projekta IP-2018-01-9085
- [5] Matejak Cvenić, K.; Ivanjek, L.; Planinić, M.; Jeličić, K.; Sušac, A.; Hopf, M. Analyzing high school students' reasoning about polarization of light, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 17, 010136 (2021)
- [6] Sušac, A.; Planinić, M.; Bubić, A.; Ivanjek, L.; Palmović, M. Student recognition of interference and diffraction patterns: An eye-tracking study, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 16, 020133 (2020)
- [7] Matejak Cvenić, K.; Planinić, M.; Sušac, A.; Ivanjek, L.; Jeličić, K.; Hopf, M. Development and validation of the Conceptual Survey on Wave Optics, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 18, 010103 (2022)
- [8] Ambrose, B. S.; Shaffer, P. S.; Steinberg, R. N.; McDermott, L. C. An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference, *Am. J. Phys.* 67, 146 (1999)
- [9] Ambrose, B. S.; Heron, P. R. L.; Vokos, S.; McDermott, L. C. Student understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena, *Am. J. Phys.* 67, 891 (1999).

- [10] Coetzee, A.; Imenda, S. N. 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, 13 (2012)
- [11] Young, H. D.; Freedman, R. A.; Ford, A. L. University Physics with Modern Physics [13th Edition] Addison-Wesley; 13th edition, (2013)