

Istraživanje učeničkog razumijevanja valne optike

Cindrić, Mateja

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:217:441318>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-11**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Mateja Cindrić

ISTRAŽIVANJE UČENIČKOG RAZUMIJEVANJA
VALNE OPTIKE

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

Mateja Cindrić

Diplomski rad

**Istraživanje učeničkog razumijevanja
valne optike**

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

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2019.

Posebno zahvaljujem svojoj mentorici doc.dr.sc Maji Planinić na potpori, trudu, uloženom vremenu i inspiraciji tijekom izrade ovog diplomskog rada, kao i Karolini Matejak Cveniće.

Zahvaljujem i svojim roditeljima na strpljenu i podršci tijekom cijelog studiranja. Zahvaljujem se i svom dečku Antunu Lovri na motivaciji koju mi je pružao, te svim prijateljima na razumijevanju i podršci.

Sažetak

Razumijevanje učeničkih poteškoća ima važnu ulogu za unaprijeđenje kvalitete nastave fizike. Gradivo poput valne optike pred učenike stavlja vrlo apstraktne i zahtjevne pojmove i pojave, koje učenici nisu imali prilike sresti u svakodnevnom životu. Motivirani tom činjenicom, proveli smo kvalitativno istraživanje na devet učenika četvrtih razreda opće i prirodoslovno-matematičke gimnazije u Zagrebu kako bismo provjerili njihovo znanje i razumijevanje valne optike nakon redovite nastave o toj temi. Istraživanje je provedeno u obliku polustrukturiranih intervjua, a obuhvaćalo je teme polarizacije, interferencije iz dvaju izvora i na optičkoj rešetci i ogiba na pukotini. Rezultati istraživanja su analizirani, grupirani po poteškoćama te uspoređeni s ranijim istraživanjima provedenim na Sveučilištu u Washingtonu. Ustanovljene ključne poteškoće vezane za koncepte interferencije, ogiba i polarizacije svjetlosti sugeriraju da bi za ovu temu bila važna istraživački usmjerena nastava, u kojoj pokusi imaju glavnu ulogu. Iako smo pronašli poteškoće koje su se pojavile i u istraživanjima provedenima u drugim zemljama, otkrivene su i neke nove poteškoće. Poteškoće su objašnjene i grupirane, a popraćene su i učeničkim citatima iz intervjua i crtežima.

Ključne riječi: učeničke poteškoće, valna optika, interferencija, ogib, polarizacija, nastava fizike, pokusi.

An investigation of students' understanding of wave optics

Abstract

Understanding students' conceptions and difficulties has a very important role for improving quality of physics teaching. Wave optics concepts are very abstract and complex, and they are not a part of student's everyday life. Motivated with the aforementioned facts, we conducted a qualitative research on nine high school students from one general type gymnasium and one gymnasium specializing in science and mathematics from Zagreb. We tested students' knowledge after they had completed regular classes on wave optics. The research was conducted in the form of semistructured interviews that included topics of polarization, double slit and optical grating interference, and single slit diffraction of light. The results were analyzed, classified by students' difficulties and compared with the previous research of the group at the University of Washington. The identified students' main difficulties related to the concepts of interference, diffraction and polarization suggest that inquiry-based teaching, in which experiments play a central role, would be important for the teaching of wave optics. In addition to the student difficulties found in previous studies, several new difficulties were also found. Student difficulties were classified, explained and accompanied by students' quotes and drawings from the interviews.

Keywords: students' difficulties, wave optics, interference, diffraction, polarization, physics teaching, experiments.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Valna optika u srednjoj školi	3
3	Teorijski okvir istraživanja	6
4	Pregled istraživanja u valnoj optici	8
4.1	Interferencija svjetlosti	8
4.2	Ogib na jednoj pukotini	10
4.3	Optička rešetka	11
4.4	Polarizacija	12
5	Metodologija istraživanja	14
5.1	Način provođenja intervjua	14
6	Rezultati i diskusija	21
6.1	Interferencija iz dvaju izvora	21
6.2	Optička rešetka	25
6.3	Ogib na jednoj pukotini	30
6.4	Polarizacija	34
7	Ključne učeničke poteškoće	39
8	Zaključak	44
	Dodatak	45
	Literatura	48

1 Uvod

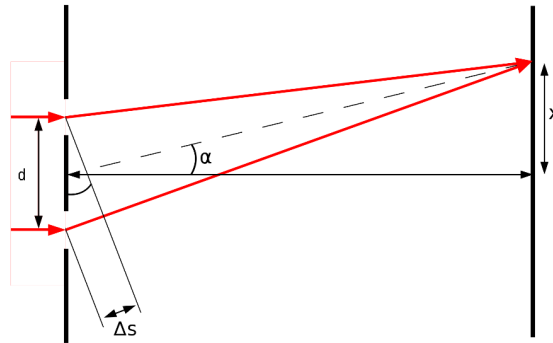
Danas kažemo da svjetlost ima dualnu prirodu, jer su eksperimenti pokazali da neke pojave vezane uz svjetlost možemo opisati valnim, a neke čestičnim modelom. Svjetlost je u klasičnoj fizici mogla biti samo val ili samo čestica, no danas se dualno ponašanje svjetlosti tumači kvantnom fizikom u kojoj se uvode fotoni, kao čestice ili kvanti svjetlosti, čija je energija određena frekvencijom svjetlosnog vala [1]. Empirijski zakoni o svjetlosti, do kojih se došlo generalizacijom opažanja, dio su geometrijske optike. Svrha geometrijske optike je otkrivanje zakona koji su odgovorni za stvaranje slika pomoću optičkih sustava. U njoj koristimo model svjetlosnih zraka kako bismo opisali pravocrtno širenje svjetlosti. Geometrijska optika zanemaruje valnu prirodu svjetlosti. Kako je svjetlost elektromagnetski val, morala bi pokazivati svojstva karakteristična za valove, kao što su interferencija, ogib i polarizacija. Otkriće da svjetlost ima valna svojstva utjecalo je na razvoj fizike (interferometrija, spektroskopija) i mnoge njene primjene važne za svakodnevni život (npr. polarizacijske naočale, LCD ekrani), stoga je ključno učenicima ukazati na razliku geometrijske i valne optike. Upravo valna svojstva svjetlosti učenicima stvaraju velike poteškoće u razumijevanju optike. Hrvatski kurikulum [2] za srednjoškolsko četverogodišnje učenje fizike predviđa da u trećem razredu učenici primijene osnovne valne koncepte, kao što su valna duljina, brzina vala, longitudinalni i transverzalni val i valna fronta, na nove pojave ogiba i interferencije mehaničkih valova te da upoznaju Huygensov princip. Zatim bi na kraju trećeg razreda učenici trebali primijeniti zakone geometrijske optike za opisivanje pojava poput razlaganja svjetlosti na prizmi, potpunog odbijanja svjetlosti i loma svjetlosti i usvojiti neke nove koncepte, kao što su indeks loma, karakteristične zrake i granični kut potpunog odbijanja.

Učenici s valnom optikom započinju na početku četvrtog razreda. Opisuju svjetlost kao val, analiziraju ogib i interferenciju svjetlosti, opisuju raspršenje i polarizaciju svjetlosti. Usvajaju pojmove kao što su koherentni izvori, optički put, razlika hoda i faza, elektromagnetski val. Geometrijska optika, kao i svojstva mehaničkih valova, mogu se direktno pokusima pokazati učenicima na nastavnom satu. Učenici mogu vidjeti kako se stvara slika na raznim optičkim sustavima, a valne pojave vezane uz mehaničke valove mogu promatrati u bazenu s vodom. Pokusi u valnoj optici imaju još veću važnost. Valna priroda svjetlosti mnogim učenicima nije intuitivna

stoga im mogu pomoći pokusi s mehaničkim valovima koje su vidjeli u prethodno opisanim lekcijama kao mehanička analogija s pojavama u valnoj optici. Učeničko istraživanje pomoću pokusa ili demonstracija opservacijskih pokusa u valnoj optici na nastavnom satu mogu razviti dobro razumijevanje njenih koncepata, zato što jedino tako učenici mogu uočiti ključne aspekte pojava u valnoj optici.

2 Valna optika u srednjoj školi

Valna optika započinje opisom Youngovog pokusa (interferencije svjetlosti pomoću dviju pukotina), koji se sastoji od izvora monokromatske svjetlosti, dviju pukotina i zastora (Slika 2.1).



Slika 2.1: Youngov pokus (Preuzeto s https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Double-slit_schematic.svg)

Stalnu interferentnu sliku možemo dobiti ako izvori imaju približno jednake amplitude i ako su koherentni, odnosno moraju imati stalnu razliku u fazi i jednake frekvencije, odnosno valne duljine. Dva koherentna vala možemo dobiti iz jednog vala [1]. To se lako može postići kod valova na površini vode. Kad valna fronta dođe do dvije jednake pukotine, prema Huygensovom principu one postaju izvor novih valova. Ono što vrijedi za valove na površini vode očekujemo da vrijedi i za svjetlosne valove, kod kojih koherentne izvore dobivamo pomoću dviju pukotina, Fresnelove biprizme, Lloydovih zrcala ili drugih načina stvaranja dva izvora od jednog. Interferencija svjetlosti postoji i kod nekoherentnih izvora, ali tada ju ne možemo primijetiti, jer se slika u prostoru stalno mijenja, te nemamo stalna mjesta pojačanja i poništenja. Postoje dvije vrste interferencije: konstruktivna i destruktivna. Da bismo dobili konstruktivnu interferenciju, optička razlika hoda Δs mora biti jednaka cjelobrojnemu višekratniku valne duljine λ , odnosno:

$$\Delta s = d \sin(\alpha) = k\lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

Optička razlika hoda (razlika optičkih putova od svakog izvora do promatrane točke) mora se izraziti u valnim duljinama. Ako je razlika hoda $k\lambda$, valovi su u fazi (konstruktivna interferencija); ako je razlika hoda $\Delta s = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$, valovi su u protufazi (des-

truktivna interferencija). Upoznavanje pojave ogiba ili difrakcije u školi započinje primjerom iz geometrijske optike, odnosno pojavljivanjem oštre sjene na zastoru, ako svjetlošću obasjavamo neproziran predmet [1]. Oštra sjena objašnjava se pravocrtnim širenjem zraka svjetlosti, no kad se napravi isti pokus s vrlo malim predmetima, kao što su vlas kose ili kuglica malog promjera, sjena više nije oštra, štoviše na zastoru se pojavljuje niz svijetlih i tamnih pruga ili koncentričnih kružnica (kolora). Zaključujemo kako dolazi do ogiba svjetlosti, odnosno da svjetlost može doći i u područja koja geometrijska optika zabranjuje. Promatramo li valnu frontu koja je stigla do prepreke, svaka točka te valne fronte izvor je elementarnog vala prema Huygensovom principu [3]. Elementarni val se iz točke na rubu prepreke jednim dijelom širi u područje iza prepreke. Svijetle i tamne pruge, koje vidimo na zastoru iza prepreke obasjane svjetlošću, posljedica su interferencije svjetlosti koja se ogiba na prepreci. Da bismo uočili ogibnu sliku na zastoru, veličina zapreke ili otvora d mora biti usporediva s valnom duljinom svjetlosti. Uvjet za minimum za ogib na pukotini je sljedeći:

$$d \sin \alpha_k = k \lambda, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (2.2)$$

gdje je α kut pod kojim se vidi k -ti minimum u odnosu na smjer upadne svjetlosti na pukotinu. Izvedeni uvjet odnosi se na razliku putova rubnih zraka snopa, ali bitno je napomenuti kako ne interferiraju samo rubne zrake, već cijeli snop. Možemo reći kako je ogibna slika na pukotini zapravo posljedica interferencije svjetlosti iz beskonačno mnogo izvora, jer je svaka točka pukotine izvor novog vala. Ogibna slika se mijenja ako pukotinu sužavamo, naime, središnji maksimum se širi, prema navedenom uvjetu za minimum.

Nakon promatranja interferencijske slike s dvije pukotine, promatramo što će se promijeniti u interferencijskoj slici ako povećavamo broj pukotina. Optička rešetka je niz vrlo uskih međusobno jednako udaljenih pukotina (zareza). Razmak između susjednih pukotina nazivamo konstantom rešetke (d). Na svakom milimetru duljine može se nalaziti i nekoliko tisuća pukotina [1]. Uvjet za nastajanje maksimuma je sljedeći:

$$d \sin \alpha_k = k \lambda, \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (2.3)$$

gdje je k redni broj maksimuma, d razmak između susjednih pukotina, a α kut pod kojim se vidi k -ti maksimum u odnosu na smjer upadne svjetlosti na pukotinu. Iz

izraza (2.3) vidimo da je kut pod kojim se formira pojedini maksimum u odnosu na upadni smjer svjetlosti to veći što je veća valna duljina svjetlosti [1]. Obasjamo li rešetku s bijelom svjetlošću svaki ogibni maksimum vidjet ćemo kao niz boja od kojih se sastoji bijela svjetlost. U sredini ogibnog uzorka vidimo bijelu prugu jer do nje dolaze svjetlosni valovi svih valnih duljina koje su dio bijele svjetlosti u fazi.

Interferencija i ogib svjetlosti pokazuju da svjetlost ima valnu prirodu, ali ne govore o tome je li svjetlost transversalan ili longitudinalan val. Svjetlost je elektromagnetski val, koji se sastoji električnog i magnetskog polja koja su međusobno okomiti. Ravnina u kojoj titraju električno i magnetsko polje okomita je na smjer širenja vala. Ukoliko električno i magnetsko polje titraju u svim smjerovima na toj ravnini, taj val nazivamo **nepolariziranim**. Propustimo li bijelu svjetlost kroz polarizacijski filter, tada on propušta samo one titraje električnog polja koji titraju u jednom određenom smjeru (paralelno s osi polarizacijskog filtra). Takvu pojavu nazivamo polarizacijom, a za svjetlost nakon prolaska kroz polarizacijski filter kažemo da je polarizirana. Budući da golim okom ne možemo razlučiti je li svjetlost koju opažamo polarizirana ili nepolarizirana koristimo drugi polarizacijski filter - **analizator**. Taj polarizacijski filter analizira je li svjetlost polarizirana i, ako jest, u kojem smjeru titra električno polje. Ako je os analizatora paralelna s osi polarizatora, tada analizator propušta svu svjetlost; ako ih postavimo okomito, analizator neće propustiti nikakvu svjetlost. Polarizacijske filtre koristimo u svakodnevnom životu za eliminiranje polarizirane svjetlosti nastale refleksijom na površini vode, stakla i sličnih materijala.

3 Teorijski okvir istraživanja

Učenici razvijaju koncepte i mentalne modele fizikalnih pojava i izvan škole. Mentalni modeli su unutrašnje reprezentacije neke pojave ili situacije koje omogućavaju predviđanje, zaključivanje i razumijevanje [5]. Učenički mentalni modeli fizikalnih pojava i pripadni koncepti često mogu biti pogrešni, nepotpuni i nedovoljno razvijeni. Konceptualna promjena je kognitivni proces prilikom kojeg učenik transformira svoje koncepte i modele tijekom učenja. Takva promjena sama po sebi nije lagan proces za učenika, jer informacije koje učenik dobiva od okoline često nije u stanju uklopiti u postojeće mentalne strukture [6]. Kako se pogrešni koncepti i modeli formiraju? Danas je vodeća teorija u području edukacijskih istraživanja u fizici tkz. „knowledge as elements“ teorija [6], prema kojoj se učenički modeli stvaraju u danim situacijama aktivacijom osnovnih elemenata zaključivanja (tkz. phenomenological primitives ili p-prims). Učenici tada elemente znanja, koji ne moraju nužno biti pogrešni, aktiviraju za rješavanje postojećeg problema. Aktivirani elementi znanja, iako po sebi nisu pogrešni, često nisu prikladni za objašnjenje određenog problema. Primjer takvog zaključivanja istraživači su primijetili kad su s učenicima raspravljali o godišnjim dobima [7]. Mnogi su učenici na pitanje zašto je ljeti toplije odgovorili da je to zato što je Sunce tada bliže Zemlji. Učenici su ovdje iskustvo iz okoline (toplije nam je ako smo bliže izvoru topline) i osnovni element zaključivanja „bliže znači jače“, pogrešno primijenili u zadanom pitanju, za koje ovaj aspekt nije relevantan. Za njih bliže znači toplije u ovom kontekstu, te su taj element znanja iskoristili za odgovaranje na pitanje o kojem prije možda nisu razmišljali ili im prije nije bilo postavljeno. Dobiveni pogrešni odgovori u ovom primjeru ne znače da učenici nužno imaju čvrste alternativne ideje o nastanku godišnjih doba, nego da su potaknuti pitanjem generirali ovakav model pojednostavljenim zaključivanjem.

Danas se smatra da svi učenički pogrešni modeli nastaju aktivacijom neprikladnih kognitivnih resursa, poput osnovnih elemenata zaključivanja i nekih prijašnjih znanja i iskustava, no moguće je da poneki tako nastali modeli uz potporu iskustva dobiju status prilično čvrstih alternativnih ideja ili modela (npr. „stalna sila izaziva gibanje stalnom brzinom“). Učeničkim mentalnim modelima treba pažljivo pristupiti. Budući da učenici ne susreću često pojave valne optike u svojoj okolini i svakodnevnom životu za pretpostaviti je da ne stvaraju prije učenja valne optike čvrste alternativne

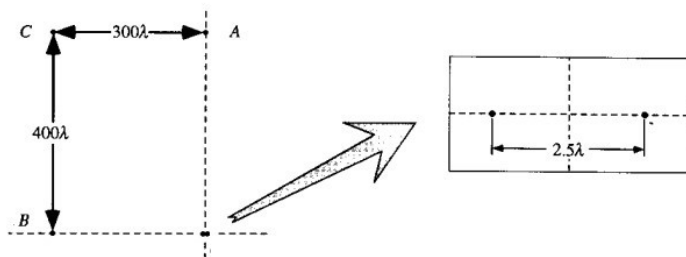
ideje, koje treba mijenjati, već svoja objašnjenja formiraju po potrebi aktivacijom resursa [6,7].

4 Pregled istraživanja u valnoj optici

Edukacijska istraživanja o nastavi fizike, provedena na području valne optike, pomažu nam pri oblikovanju novih istraživanja kojima možemo detaljno analizirati učeničko razumijevanje. Ranija istraživanja temeljila su se na analizi učeničkog razumijevanja polarizacije, ogiba na jednoj pukotini, interferenciji na dvije pukotine (Youngov pokus) i na optičkoj rešetci [8–11]. Slijedi pregled glavnih rezultata.

4.1 Interferencija svjetlosti

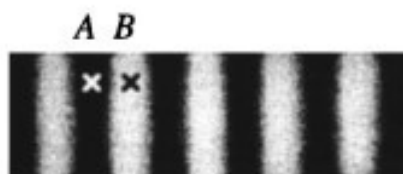
Istraživačka grupa na Sveučilištu u Washingtonu [8] provela je intervju sa studentima nižih i viših godina studija koji su bili upoznati s gradivom valne optike. Valovi na vodi dobro prikazuju valne fronte i prikladni su za lakše shvaćanje svjetlosnih valova, pa je istraživačka grupa započela istraživanje primjerom s dva koherentna izvora na vodi udaljenima za 2.5λ (Slika 4.1).



Slika 4.1: Dva koherentna izvora valova na vodi [8]

Označena točka A jednako je udaljena od oba izvora za 400λ , točka B udaljena je od lijevog izvora za 300λ , dok se točka C nalazi na udaljenosti od 400λ od točke B. Studenti su morali odrediti razliku hoda i vrstu interferencije (konstruktivna ili destruktivna) u zadanim točkama. Samo 35% studenata (od ispitanih 1200) odgovorilo je točno za točku A i B (razlika hoda za točku A je nula, stoga je u njoj konstruktivna interferencija; razlika hoda u točki B je 2.5λ , pa je u točki B destruktivna interferencija) a samo 5% je točno odgovorilo za točku C (razlika hoda jednaka je 1.5λ , pa je u točki C destruktivna interferencija). Najčešće studenti nisu računali razliku hoda nego su zaključivali o interferenciji na temelju smjera u kojem se valovi gibaju od svakog izvora. Jedan od odgovora je bio da se u točki B valovi kreću u istom smjeru, stoga će doći do konstruktivne interferencije, dok se u točkama A i C valovi ne kreću

u istim smjerovima pa će doći do destruktivne interferencije. Isto tako, mnogi su studenti zaključili kako razliku hoda možemo zanemariti na velikim udaljenostima i, budući da je udaljenost između izvora jako mala s obzirom na udaljenost točaka, na velikim udaljenostima možemo smatrati da imamo samo jedan izvor. Budući da su mnogi studenti imali poteškoća s ovim pitanjem, za vježbu su dobili dvije prozirnice s kružnim valnim frontama koje se mogu preklapati te su pomoću dodatnih pitanja zaključivali o konstruktivnoj, odnosno destruktivnoj interferenciji. Nakon toga, studentima se ponovno postavilo isto pitanje (posebno za točku C), ali samo onim studentima koji su odslušali naknadno predavanje o interferenciji [9]. Sada su koherentni izvori bili udaljeni za 2λ . Da će u točki C biti destruktivna interferencija odgovorilo je 70% studenata. Oko 5% studenata koristilo je udaljenost od točke C do točke koja se nalazi na pola puta između izvora kako bi odredili vrstu interferencije umjesto razlike puteva. Sljedeće pitanje za interferenciju na dvije pukotine bilo je vezano uz prikazani interferencijski uzorak (Slika 4.2). Studenti su trebali pretpostaviti što će se dogoditi s opaženim uzorkom ukoliko prekrijemo jednu pukotinu.



Slika 4.2: Interferencijski uzorak [9]

Da će cijeli zastor biti jednoliko osvijetljen odgovorilo je 20% do 40% studenata, ovisno o tome je li pitanje bilo postavljeno na početku predavanja o interferenciji ili pri kraju (na ovo pitanje odgovaralo je preko 600 studenata). Potaknuti lošim rezultatima, istraživači su osmislili zadatak u kojem će studentima biti predloženo postavljeno pitanje. Postavili su izvor i ispred izvora dvije uske pukotine, koje su udaljene za 3λ , u bazen s vodom. Na temelju označenih valni fronti, studenti su trebali na određenoj udaljenosti od pukotina odrediti mjesta konstruktivne, odnosno destruktivne interferencije. Nakon što su dobili određeni uzorak, trebali su ga usporediti s uzorkom koji je nastao interferencijom svjetlosti u postavljenom pitanju. Zaključili su kako konstruktivna interferencija odgovara maksimumima, a destruktivna minimumima. Na temelju tog zadatka, studenti su bili u mogućnosti pretpostaviti što će se dogoditi ukoliko prekrijemo jednu pukotinu. Većina ih je zaključila kako će zas-

lon biti jednoliko osvjetljen. Analizom studentskih odgovora, istraživači su zaključili kako mnogi studenti miješaju geometrijsku i valnu optiku. Oko 45% studenata koristilo je model koji je uključivao elemente geometrijske optike i elemente valne optike. Neki od studenata zaključili su kako će se prekrivanjem jedne od pukotina interferencijski uzorak prepoloviti, odnosno da će ta polovica uzorka nestati. Smatraju kako je svaka pukotina odgovorna za jednu polovicu interferencijskog uzorka. Kako bi studenti uočili da geometrijska optika nije prikladna kad se radi o svjetlosti koja prolazi kroz usku pukotinu, prikazan im je eksperiment interferencije kroz dvije pukotine. Usporedbom svojih predviđanja i ishoda pokusa studenti su uočili kako ovdje više ne mogu primijeniti ideje geometrijske optike.

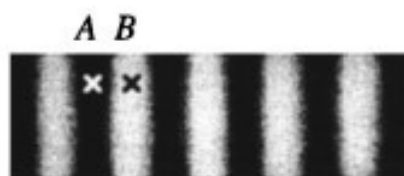
4.2 Ogib na jednoj pukotini

Istraživanje razumijevanja ogiba na jednoj pukotini provedeno je na 46 studenata na Sveučilištu u Washingtonu [9] (16 studenata koji su položili predmet uvodne fizike i 30 studenata koji su položili predmet moderne fizike). Ispitivanje počinje sa zadatkom koji sadrži lampicu, pukotinu i zaslon. Studenti su trebali zaključiti što će vidjeti na zaslonu ukoliko lampicu sve više udaljavamo od pukotine i što ako pukotinu sve više sužavamo. Studenti na ovom pitanju nisu znali u kojim situacijama vrijedi geometrijska optika, a u kojima valna. Česta pogreška studenata na ovom zadatku bila je vezana uz pukotinu, naime, smatrali su da je pukotina sekundarni točkasti izvor svjetlosti. Neki su isto tako pretpostavili da će slika na zaslonu biti kružnog oblika, iako je pukotina pravokutnog oblika. Jedna studentica predviđjela je da će osvjetljeni dio na zaslonu postati veći od geometrijske slike ukoliko pukotinu sve više sužavamo. Sljedeće pitanje postavljeno je studentima nižih i viših godina koji dolaze od različitih predavača. Prikazan im je difrakcijski uzorak na temelju kojega su trebali pretpostaviti što će se dogoditi ukoliko prekrijemo pola pukotine, odnosno, ako ju suzimo. Samo 10% studenata nižih godina, i 5% studenata viših godina odgovorilo je točno (ukupno je ispitano 410 studenata). Najčešća pogreška među ispitanicima bila je vezana uz središnji maksimum. Studenti su pretpostavili kako će se sužavanjem pukotine suziti i središnji maksimum. Oko 20% studenata pretpostavilo je da će se smanjiti udaljenost prvih minimuma. Dakle, studenti su opet primjenjivali geometrijsku optiku u postavljenom problemu. Nadalje, oko 25% studenata smatra

kako samo svjetlost koja dolazi na rubove pukotine utječe na stvaranje difrakcijskog uzorka. Uspoređivanjem valne duljine svjetlosti i širine pukotine, studenti (pogotovo nižih godina) često su smatrali kako u slučaju kad je širina pukotina puno manja od valne duljine, svjetlost neće "stati" u pukotinu, stoga na zaslonu nećemo vidjeti ništa. Iako studenti ispravno koriste geometrijsku optiku za slučaj kad je širina pukotine puno veća od valne duljine, često taj isti koncept prenose i na slučaj kad širinu pukotine smanjimo tako da je manja od valne duljine svjetlosti. Česti pogrešni odgovori vezani su za fotone i njihovu povezanost sa stvaranjem interferencijskog i difrakcijskog uzorka. Mnogi studenti smatraju kako se fotoni gibaju duž pravaca koji se na rubovima pukotina savijaju (skreću). Skoro polovica studenata viših godina smatra kako su fotoni čestice koje se gibaju duž sinusoidalnih krivulja. Ukoliko dio te krivulje naiđe na rub pukotine, dolazi do loma krivulje i samo neki fotoni nastavljaju dalje. Studente koji su očekivali vidjeti maksimume i minimume na zastoru u slučaju jako uske pukotine pitalo se kako će se razlikovati uzorak ako intenzitet svjetlosti smanjimo. Mnogi su studenti smatrali kako tada neće doći do pojave uzorka ili da će se na zaslonu pojaviti mnoštvo sitnih točkica, koje neće stvoriti nikakav uzorak, jer ih je premalo da bi interferirale (čak i nakon duljeg vremenskog intervala).

4.3 Optička rešetka

Studenti Sveučilišta u Washingtonu nakon predavanja i testova iz interferencije na dvije pukotine razmatrali su uzorak na tri pukotine [9]. Na interferencijskom uzorku od dvije pukotine odabrane su dvije točke. Točka A nalazi se u području gdje je intenzitet nula, a točka B gdje je intenzitet maksimalan (Slika 4.3).



Slika 4.3: Interferencijski uzorak [9]

Studenti su trebali pretpostaviti što će se pojaviti u zadanim točkama ukoliko dodamo treću pukotinu, na istu udaljenost na kojoj su prve dvije. Od 560 ispitanih studenata, samo 10% dalo je točan odgovor za obje točke. Mnogi su studenti tvrdili kako će se promjenom broja pukotina promijeniti cijeli uzorak, naime, nisu uzimali u

obzir razliku u putovima. Nakon ispitivanja, istraživači su osmislili pomoćni zadatak, koji bi razjasnio poteškoće vezane za taj problem. Studentima su podijeljeni sinusoidalni grafovi (transparentni). Kombiniranjem i slaganjem grafova, studenti su lako mogli doći do zaključka kako će se, u slučaju dviju pukotina, minimum pojaviti kad je razlika između pukotina jednaka umnošku neparnog broja i $\lambda/2$. Zatim su istraživali što će se pojaviti ukoliko dodaju treću pukotinu. Slaganjem trećeg grafa, uočili su kako glavni maksimum (mjesto na kojem je svjetlost uvijek u fazi bez obzira na broj pukotina) uvijek ostaje na istom mjestu, ali se sada na području minimuma nalazi još jedan manje intenzivni maksimum oko kojeg su dva minimuma. Postupak su ponovili i za četiri pukotine, a zatim su izveli općeniti izraz za N pukotina, te zaključili kako će biti $N - 1$ minimuma između svaka dva glavna maksimuma.

4.4 Polarizacija

Istraživanje provedeno na Sveučilištu u Washingtonu u SAD [10] pokazalo je kako studenti objašnjavaju pojavu polarizacije svjetlosti (ostvarenu pomoću polarizirajućih filtara). Nakon prvog predavanja o polarizaciji svjetlosti i predavanja o elektromagnetskim valovima, studentima je postavljeno pitanje vezano za međusobnu ovisnost električnog i magnetskog polja u elektromagnetskom valu. Istraživači su postavili zadatak u kojem je os polarizacijskog filtra paralelna s magnetskim poljem upadne svjetlosti. Studenti su morali predvidjeti što će se dogoditi s električnim i magnetskim poljem nakon što svjetlost prođe kroz filter. Ispitano je 300 studenata, od kojih je 30% odgovorilo točno, a 55% studenata netočno. Kod 45% studenata odgovor je bio da će magnetsko polje u potpunosti proći kroz polarizacijski filter. Studenti smatraju kako su električno i magnetsko polje elektromagnetskog vala dvije nezavisne veličine. Slične pokuse postavila je istraživačka grupa na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, koja je ispitala učenike opće i klasične gimnazije u Zagrebu [11]. Učenici su na temelju poznatog polarizacijskog filtera morali osmisliti pokus pomoću kojega će utvrditi koji od preostala dva je isto tako polarizacijski filter. Najčešća poteškoća koja je uočena kod učenika bila je vezana za smjer širenja svjetlosti i smjer polarizacije. Naime, učenici smatraju kako se svjetlost prije prolaska kroz polarizacijski filter širi u svim smjerovima, a nakon što prođe, širi se samo u jednom smjeru. Učenici ovdje neprimjereno koriste mehaničku analogiju koja je često spomenuta u udžbenicima.

Često se polarizacija objašnjava pomoću analogije užeta i rešetke gdje učenici tu analogiju netočno primjenjuju za objašnjavanje polarizacije svjetlosti.

5 Metodologija istraživanja

Istraživanje je provedeno na devet učenika četvrtih razreda opće i prirodoslovno-matematičke gimnazije u Zagrebu. Sudjelovalo je šestero učenika opće gimnazije i troje učenika prirodoslovno-matematičke gimnazije, koji su u trećem razredu iz valne optike dobili ocjenu dobar, vrlo dobar ili odličan. Ispitivanje je provedeno u obliku polustrukturiranog intervjua, a sastojalo se od 4 skupine pitanja: polarizacija, interferencija iz dvaju izvora, optička rešetka i ogib na pukotini. Učenici su, kao i njihovi roditelji, bili unaprijed informirani o istraživanju te su dali pismeni pristanak na sudjelovanje i audio snimanje intervjua. Kako bi ostali anonimni, učenici će u ovom radu biti označeni izmišljenim imenima, a broj pored imena označit će ocjenu koju učenik ima iz tog dijela gradiva.

5.1 Način provođenja intervjua

Ispitivanje je zabilježeno na audio zapisima, koji su se kasnije transkribirali i analizirali. Od učenika se očekivalo da svoja razmišljanja govore naglas (to je tkz. “think aloud” protokol, koji omogućuje uvid u učenikovo razmišljanje tijekom odgovaranja). Ispred učenika nalazila se optička klupa na kojoj su se izmjenjivali postavi za demonstracijske pokuse iz valne optike. Učenici su na predviđenim papirima (Dodatak A) zabilježili svoja očekivanja, opažanja i objašnjenja za svaki pokus. Tijekom ispitivanja učenici nisu znali jesu li točno ili netočno odgovorili na postavljena pitanja. Odgovore i objašnjenja učenici su mogli dobiti tek nakon ispitivanja. Polustrukturirani intervju sastojao se od osnovnih pitanja iz svakog ispitivanog područja valne optike, koja su navedena u daljnjem tekstu prema temama. Između zadanih pitanja po potrebi su se postavljala dodatna potpitanja.

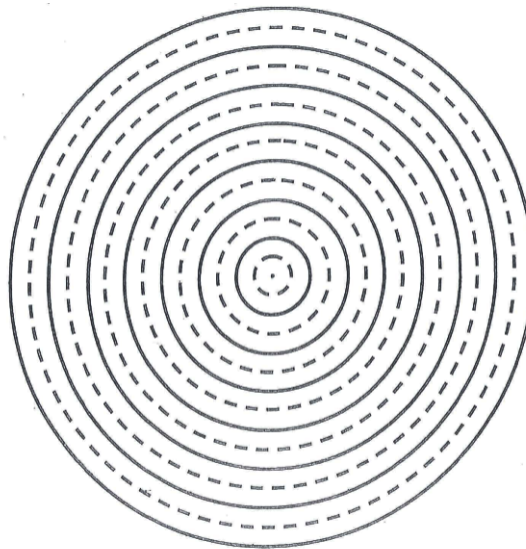
Interferencija iz dvaju izvora

1. Sada ću staviti dijapozitiv s dvije pukotine u držač ispred lasera. Što očekuješ vidjeti na zastoru kada upalim crveni laser i kada svjetlost iz crvenog lasera prođe kroz ove dvije uske paralelne pukotine? Skiciraj to u polje 2a.
2. Što uočavaš na zastoru? Skiciraj i opiši svoje opažanje u polje 2b. Slaže li se tvoje opažanje s tvojim očekivanjem? Što misliš, kako je nastala slika koju promatramo na zastoru?

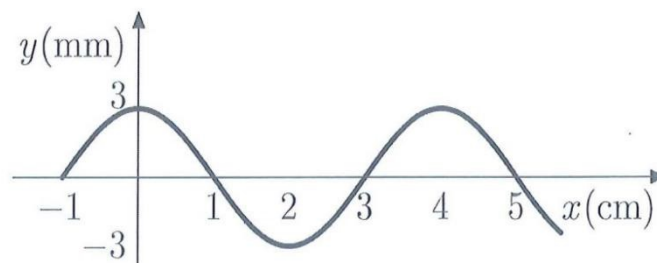
3. (Izabrati jedan max, ne središnji) Možeš li objasniti zašto je na ovom mjestu nastao maksimum? Postoji li neko pravilo u kojem slučaju se javlja minimum, a u kojem maksimum? Možeš li ga matematički iskazati?

Zadaci s valovima na vodi i dva koherentna izvora

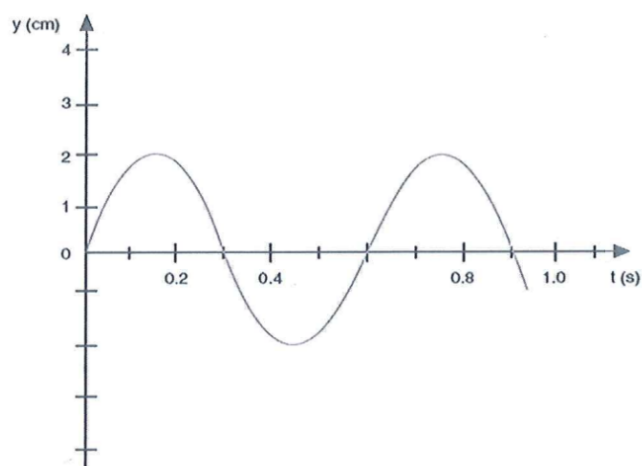
1. Ovdje ćemo razmatrati valove na vodi. Ove dvije crne točke su koherentni izvori valova na vodi. Znaš li što su to koherentni izvori valova?
2. Kad vidiš ove kružnice, koje sve informacije možeš dobiti iz njih?
3. Val se često prikazuje i putem grafova. Koje informacije možeš dobiti iz sljedećih grafova (Slike 5.1 - 5.3)?



Slika 5.1: Prikaz valnih crta valova na vodi u obliku koncentričnih kružnica



Slika 5.2: Elongacija vala u ovisnosti o položaju

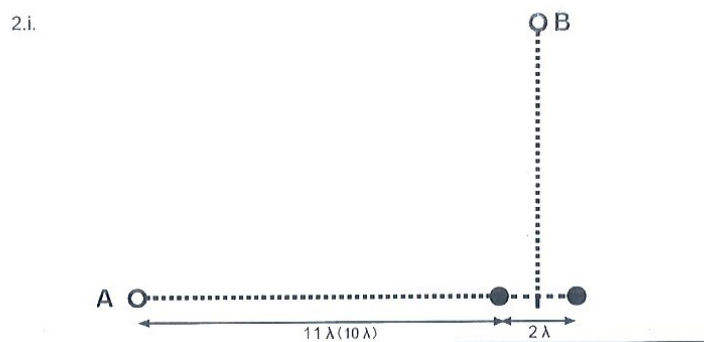


Slika 5.3: Elongacija vala u ovisnosti o vremenu

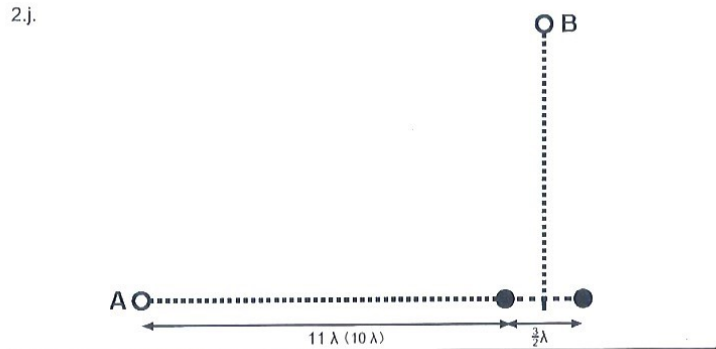
4. Na slici 2.i (Slika 5.4) koherentni izvori valova međusobno su udaljeni za dvije valne duljine. Točka A udaljena je od lijevog izvora za 11 valnih duljina. Točka B jednako je udaljena od oba izvora. Možeš li mi reći hoće li u točki A biti maksimum ili minimum? Zašto?

10 λ

2.i.



2.j.

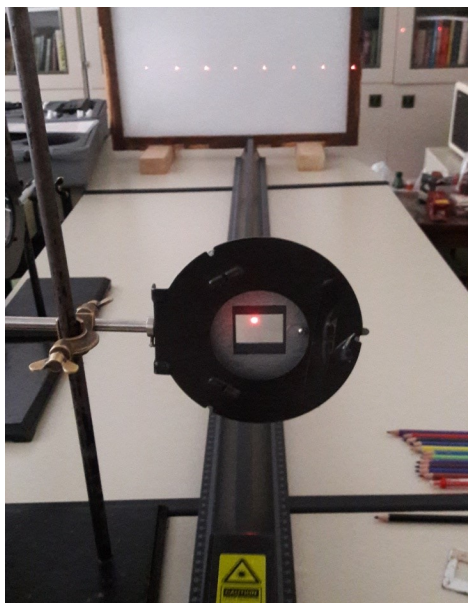


Slika 5.4: Dva koherentna izvora - točka A je udaljena za 10λ ili 11λ

5. Možeš li mi reći hoće li u točki B biti maksimum ili minimum? Zašto?
6. Zamisli da je točka A udaljena od lijevog izvora za 10 valnih duljina. Što bi u tom slučaju nastalo u točki A: maksimum ili minimum? Zašto?
7. Ponovno imamo dva koherentna izvora valova na vodi, samo su ovaj puta oni udaljeni za tri polovine valne duljine. Točka A je udaljena od lijevog izvora za 11 valnih duljina, a točka B je jednako udaljena od oba izvora. Možeš li mi reći hoće li u točki A biti maksimum ili minimum? Zašto?
8. Možeš li mi reći hoće li u točki B biti maksimum ili minimum? Zašto? Znaš li možda neku formulu, koja opisuje uvjet maksimuma ili minimuma interferencije?
9. Zamisli da je točka A udaljena od lijevog izvora za 10 valnih duljina. Što bi u tom slučaju nastalo u točki A: maksimum ili minimum? Zašto?

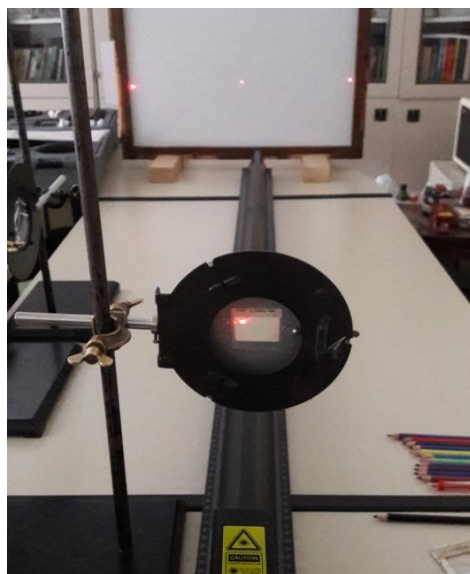
Optička rešetka

1. Sada ću u držač između lasera i zastora staviti optičku rešetku od 80 zareza/mm. (Slika 5.5). Što očekuješ da ćeš vidjeti na zastoru ako kroz tu rešetku prođe crvena svjetlost? Skiciraj svoje opažanje u polje 3b. Zašto to očekuješ?



Slika 5.5: Postav za optičku rešetku od 80 zareza/mm

2. Sada ćemo iskoristiti rešetku od 300 zareza/mm (Slika 5.6). Što očekuješ da ćeš vidjeti na zastoru ako kroz tu rešetku prođe crvena svjetlost? Skiciraj to u polje 3d. Zašto to očekuješ?



Slika 5.6: Postav za optičku rešetku od 300 zareza/mm

3. Sada ćemo iskoristiti izvor bijele svjetlosti i jedan uski snop bijele svjetlosti usmjerit ćemo na optičku rešetku od 80 zareza/mm (Slika 5.7). Što očekuješ vidjeti na zastoru kada snop bijele svjetlosti prođe kroz rešetku od 80 zareza/mm? Skiciraj svoje opažanje u polje 3h. Zašto to očekuješ?



Slika 5.7: Postav za optičku rešetku s izvorom bijele svjetlosti

Ogib na pukotini

1. Ovaj put između lasera i zastora postaviti ću samo jednu pukotinu. Ovaj držač na sebi sadrži kotačić pomoću kojega mogu mijenjati širinu pukotine (Slika 5.8). Prvo ću maksimalno raširiti ovu pukotinu. Možeš li procijeniti kolika je širina ove pukotine?



Slika 5.8: Držač pukotine

2. Što očekuješ da ćeš vidjeti na zastoru kada svjetlost iz crvenog lasera prođe kroz pukotinu ove širine? Skiciraj svoje očekivanje u polje 4a. Objasni zašto to očekuješ?
3. Što uočavaš na zastoru? Skiciraj opažanje u polje 4b. Slaže li se to s tvojim očekivanjem?
4. Sada ću suziti ovu pukotinu. Možeš li procijeniti kolika je sada širina pukotine?
5. Što očekuješ da ćeš vidjeti na zastoru kad svjetlost iz crvenog lasera prođe kroz pukotinu ove širine? Skiciraj svoje očekivanje u polje 4c. Zašto to očekuješ?
6. Valna duljina crvene svjetlosti je oko 650 nm. Zamisli da ovu pukotinu suzimo tako da je njena širina manja od 650 nm. Što bismo tada vidjeli na zastoru, ako kroz tako usku pukotinu propustimo crvenu svjetlost? Skiciraj to u polje 4d. Zašto to očekuješ?

Polarizacija

1. Vozačima se preporučuje kupnja polarizacijskih sunčanih naočala. Zašto se one preporučuju? Koja je njihova prednost u odnosu na obične sunčane naočale?
2. Ovdje imam dvije fotografije. Opiši razlike između njih. Što misliš, koju sliku vidi osoba s polarizacijskim naočalima, a koju osoba bez njih? (Slika 5.9)



Slika 5.9: Fotografije automobila bez polarizacijskih naočala i s njima

3. Možeš li objasniti na kojem načelu rade polarizacijske naočale?
4. Ovdje imam tri dijapozitiva. Ovaj ovdje je polarizacijski filter. Možeš li osmisliti pokus kojim bi otkrio/la koji od preostala dva dijapozitiva je polarizacijski filter, a koji ne? (Slika 5.10)



Slika 5.10: Tri dijapozitiva namijenjena za pokus

5. Kako možemo pronaći razliku između ova dva dijapozitiva?
6. Kako bi opisao/la pojavu polarizacije svjetlosti?
7. Što se događa sa svjetlošću kada prođe kroz polarizacijski filter?
8. Kako ti sebi zamišljaš svjetlost?

6 Rezultati i diskusija

6.1 Interferencija iz dvaju izvora

Kod pokusa s laserom i dvije pukotine učenici su često u predviđanjima i objašnjenjima primjenjivali geometrijsku optiku. Naime, četvero učenika očekivalo je da će vidjeti dvije točkice ili dvije pruge (Slika 6.1) ukoliko snop crvene svjetlosti iz lasera proputimo kroz dvije uske pukotine.

- *Pa kad će proć kroz ovu rupu mislim da će se razlomit i da će onda nastat dvije.*

(Lisa_3, opća gimnazija)

- *Vjerojatno će prolaziti svjetlost lasera kroz dvije pukotine pa će se vidjeti te dvije pukotine.*

(Ronald_3, opća gimnazija)

2.a OČEKIVANJE



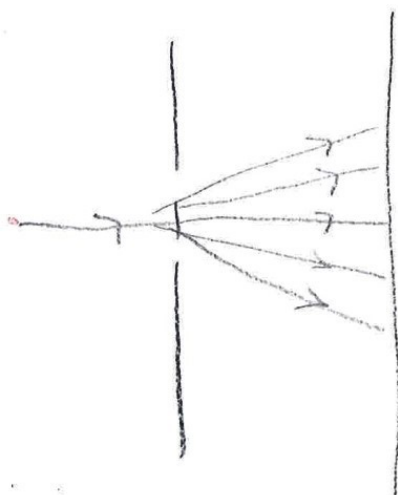
Slika 6.1: Ronald_3, opća gimnazija

Objašnjenje interferencijske slike na zastoru dalo je osam učenika, dok samo jedna učenica nije čula za interferenciju svjetlosti. Raspršenje, razlaganje ili lom svjetlosti bili su učestali odgovori, gdje se opet jasno primijetila primjena geometrijske optike:

- *K'o da se razlaže na manje dijelove ta velika. . . veći izvor svjetlosti na manje*

(Robert_3, opća gimnazija)

Učenica (Lisa_3) koja je interferencijsku sliku objasnila preko loma svjetlosti, skicirala je svoje objašnjenje (Slika 6.2). Zraka svjetlosti prolazi kroz pregradu, jer se na zastoru vidi središnja svijetla pruga.



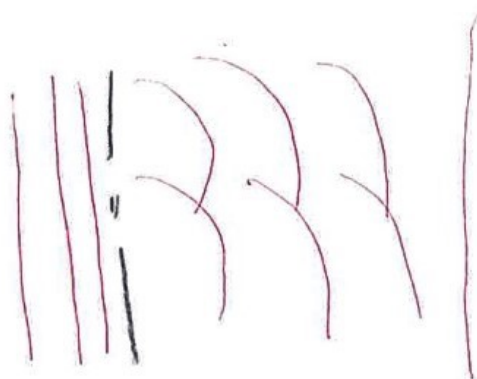
Slika 6.2: Lisa_3, opća gimnazija

Interferencijsku sliku na zastoru dvojice učenika objasnilo je preko ogiba, gdje se jasno vidi nerazlikovanje pojava interferencije i ogiba svjetlosti:

- *Pa došlo je do ogiba zato što je...došlo do ogiba....zato što dolazi i onda ne prolazi točno pod ... ne prolazi snop pod točno jednim kutom, nego dolazi do pukotine, koja je manje od njezine, ne, koja je veća od njezine valne duljine i onda zato se širi...normalna svjetlost kad se vrata otvore se širi i onda se tako...*

(Nina_4, opća gimnazija)

Viktor_5 opisao je pojavu interferencijske slike pomoću ogiba svjetlosti na sljedeći način, crtajući skicu s polukružnim valnim crtama (Slika 6.3):



Slika 6.3: Viktor_5, opća gimnazija

- *Ako je ta valna duljina svjetlosti veća odnosno od tog..pukotine...val će nekak morat proć' i onda...valjda kao elastična nekak...morat će ići u polukrug...jer ne može ovak' ići, mora ovak' se stati i onda tak će nekak...i tak prođe...ovak...kao stisne se...i onda se polagano počinje opet vraćati u normalno...*

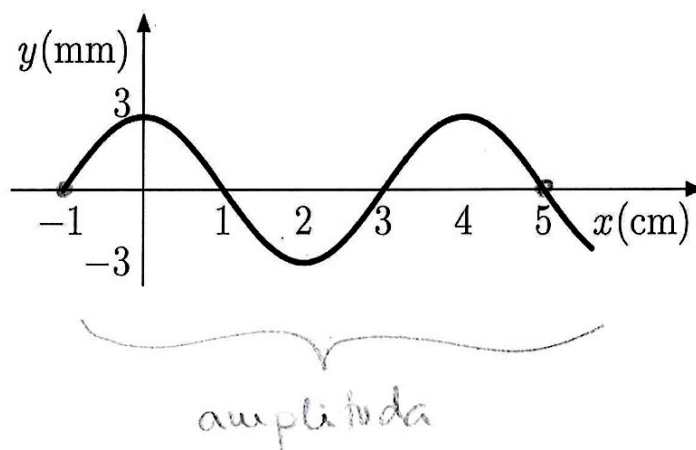
(Viktor_5, opća gimnazija)

Viktor_5 nam jasno pokazuje kako nerazumijevanje valne optike i osnovnih pojmova kao što su valna duljina i valne fronte, dovodi do stvaranja pogrešnog modela u kojem smatra kako valna duljina mora imati svojstvo elastičnosti kako bi prošla kroz pukotine.

Učenici su za dva prikazana grafa (elongacija vala u ovisnosti o položaju i elongacija vala u ovisnosti o vremenu) trebali prepoznati i odrediti osnovne valne pojmove poput valne duljine, amplitude i perioda. Valnu duljinu nije znalo odrediti petero učenika. Lisa_3 pogrešno identificira amplitudu vala (Slika 6.4), dok za valnu duljinu tvrdi da može imati više vrijednosti. Na pitanje o prepoznavanju amplitude na zadanim grafovima učenica odgovara:

- *Pa da mu se mijenja valna duljina...ide prvo iz pozitivnog pa se onda vraća u negativno.*

(Lisa 3, opća gimnazija)



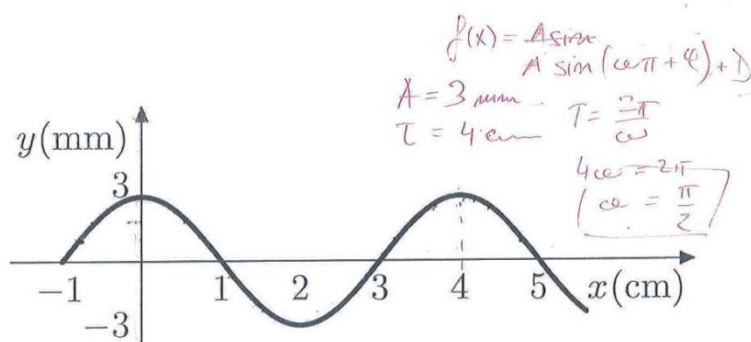
Slika 6.4: Lisa_3, opća gimnazija

Ovaj dio intervju pokazuje i kako neki učenici ne mogu povezati simbole iz matematike sa simbolima iz fizike:

- U matematici je tau, a u fizici je osnovni period... ne znam... ajmo staviti tau da bude.

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Nina_4 nije mogla odrediti period na zadnom y-t grafu, prisjećala se kako su radili na matematici i nije povezala period s ispravnom mjernom jedinicom (Slika 6.5). Nakon raspisivanja formula zaključila je kako je temeljni period izražen u centimetrima.



Slika 6.5: Nina_4, opća gimnazija

Vrstu interferencije u zadatku s dva koherentna izvora u zadanim točkama uspješno su odredile dvije učenice iz prirodoslovno-matematičke gimnazije računajući razliku hoda dok za koherentne izvore nije čulo četvero učenika. Troje učenika nije čulo za konstruktivnu i destruktivnu interferenciju, stoga je taj zadatak bio preskočen. Ostali učenici uzimaju kao kriterij interferencije smjer kretanja valova (što je potvrđeno i u ranijim istraživanjima) ili na temelju parnosti, odnosno neparnosti razlike hoda izražene u valnim duljinama zaključuju o interferenciji:

- Mislim da će se ipak kad budu išli gore, prema točki B, da će tu biti konstruktivna, jer idu prema gore oboje, no kada lijevi izvor se susretne s desnim, mislim da će tu biti ipak suprotno, odnosno destruktivna.

(Ronald_3, opća gimnazija)

- Zato što je razlika između ta dva izvora 2, što je parno, i onda mora biti konstruktivna...

(Mila_5, prirodoslovno - matematička gimnazija)

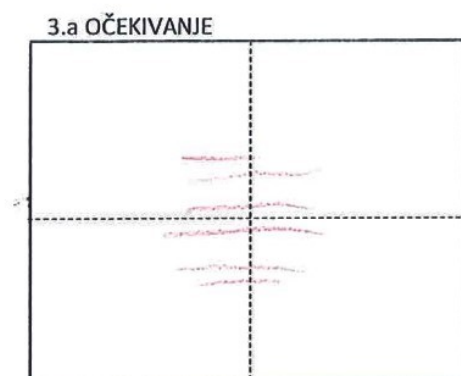
Učenici kojima su postavljena ova pitanja više su puta izmjenjivali svoje odgovore, gdje se uočilo nerazumijevanje uvjeta interferencije. Zamišljaju situaciju i pokušavaju

logički, bez računa, predvidjeti koji će dio vala doći u zadane točke, dok drugi polovične matematičke formule pokušavaju uklopiti u sliku valova koji se "sudaraju" ili "sijeku" i prilagoditi ih u rezultate koji će opravdati konstruktivnu ili destruktivnu interferenciju.

6.2 Optička rešetka

Optička rešetka od 80 zarez po milimetru

Budući da optička rešetka ima puno pukotina, učenici su najčešće zaključivali da će zbog toga na zastoru vidjeti jako puno točkica. Viktor_5 očekivao je vidjeti 80 svijetlih i 80 tamnih pruga budući da rešetka ima 80 "pruga". Dvoje učenika očekivalo je vidjeti vertikalno posložene pruge (Slika 6.6.) a samo je jedna učenica pretpostavila da će na zastoru vidjeti ekvidistantne točkice (Slika 6.7.).



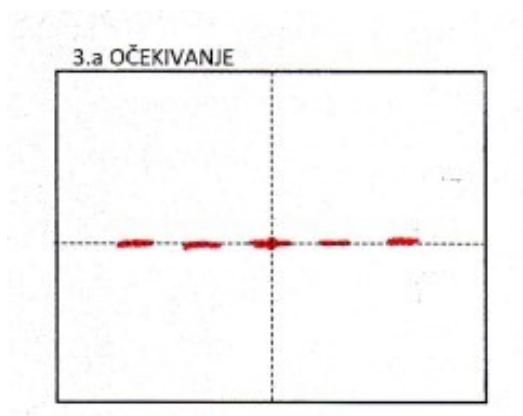
Slika 6.6: Ronald_3, opća gimnazija

Učenje napamet istaknulo se u ovom dijelu ispitivanja kod učenice prirodoslovno-matematičke gimnazije:

- *Joj kak to... više se ne sjećam...negdje u sredini je maksimum, ja mislim, i onda od maksimuma ...interferencija, optička rešetka...samo malo...ma iskreno se ne sjećam jel više razlika, ali ja mislim da će doć slično, ali ne znam...*

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Sliku na zastoru nije nikako znala objasniti samo jedna učenica, dok je četvero učenika nastalu sliku objasnilo preko odbijanja i loma svjetlosti što upućuje na pri-

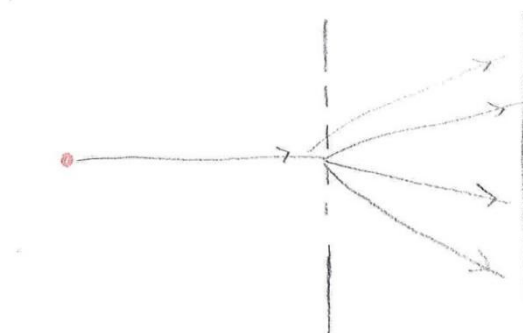


Slika 6.7: Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija

mjenu geometrijske optike. Učenica opće gimnazije objašnjava kako se jedna upadna svjetlosna zraka dijeli na više zraka kada dođe do pukotina (Slika 6.8). Takvo razmišljanje nije pronađeno u ranjim istraživanjima.

- *Pa zbog te rešetke zapravo, kad se odbila od nje, onda se zraka odbila na više njih.*

(Lisa_3, opća gimnazija)



Slika 6.8: Lisa_3, opća gimnazija

Zašto u krajnje desnom dijelu uzorka na zastoru vidimo maksimum objasnilo je dvoje učenika koristeći valne fronte kao glavni uzrok nastajanje dobivene slike na zastoru. Učenici u ovom slučaju tretiraju val kao objekt, odnosno smatraju kako val ili dio vala dolazi do zastora i dodirnuvši zastor ostavlja trag u obliku maksimuma kojeg vidimo:

- *Znači opet imam val ovako i onda opet dođe do ogiba, ovak' jedan, dva, tri, četiri, pet, šest i onda njihovi vrhovi tih polukružnica su zapravo te točkice i onda vidimo (sliku na zastoru)...*

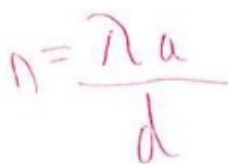
(Viktor_5, opća gimnazija)

Optička rešetka od 300 zareza po milimetru

Manji razmak između pruga na zastoru kod optičke rešetke od 300 zareza po milimetru očekivalo je troje učenika, dok su ostali učenici očekivali veći razmak. Viktor_5 očekivao je manji razmak i svoje je objašnjenje opisao matematičkom formulom (Slika 6.9) u kojoj je konstantu rešetke zamijenio s brojem zareza po milimetru što u ranijim istraživanjima nije bilo uočeno:

- *Znači taj mali "s" je razmak između dvije svijetle ili dvije tamne, lambda je valna duljina, to je crvena svjetlost sada, onda imamo "a" razmak od lasera do zastora i "d" to je ta količina tih pukotina na tom jednom milimetru ...i pošto je njih više, nazivnik je veći, brojnik će onda biti manji, jer lambda je ista, "a" su isti, znači morat će biti manji i onda će ispast manji (Slika 6.8).*

(Viktor_5, opća gimnazija)



A handwritten formula in red ink: $n = \frac{\lambda a}{d}$. The lambda symbol is written with a tilde-like stroke over it.

Slika 6.9: Viktor_5, opća gimnazija

Lisa_3 usporedila je sliku dobivenu s dvije pukotine s onom od 80, pa 300 pukotina na jednom milimetru te objasnila svoje predviđanje na sljedeći način:

- *Zato što kod prvog onog, kad smo imali samo dvije pukotine, bilo ih je...bile su skroz jedna uz drugu, a kad smo imali ovih 80 onda su bili manji razmaci i onda kod 300 su sada puno veći razmaci.*

(Lisa_3, opća gimnazija)

Veću udaljenost između maksimuma pretpostavili su Mila_5 i Alan_3. Nakon što je prikazan uzorak na zastoru, Mila_5 povezala ga je s disperzijom svjetlosti:

- *Imamo samo jedan snop svjetlosti, koji ide samo u jednom smjeru, a kad to dolazi na optičku rešetku, kaj nije da od svake linije ide radijalno...da se širi radijalno i onda može doći tamo gdje nije bila...mislim, i tu je vidimo. . .*

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

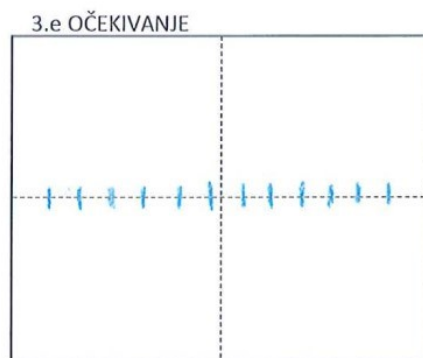
Dvoje je učenika ispravno primijenilo matematički izraz za optičku rešetku i pretpostavilo veći razmak. Nitko od učenika nije spomenuo pojavu ogiba na optičkoj rešetci. Vera_4 opisala je kako ona zamišlja kako su nastali maksimumi:

- *Budući da prolazi kroz više tih pukotina odjednom, odnosno ima ih jako puno, onda svaka od njih djeluje kao taj izvor, kao jedan novi izvor, i onda na mjestu gdje se one ,valjda, ne znam, tako zamišljam, gdje se najviše tih zraka, gdje najviše zraka čine maksimum, odnosno najviše ih se poklapa u brijegu ili dolu, tamo nastaje maksimum i tako smo dobili tu točku.*

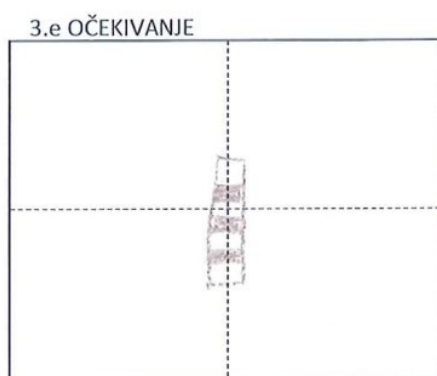
(Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Optička rešetka i izvor bijele svjetlosti

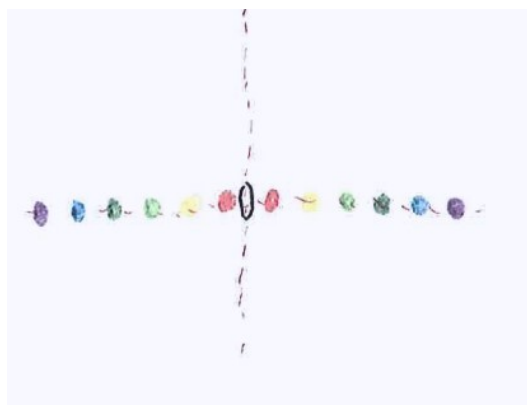
Učenici su trebali pretpostaviti što će vidjeti na zastoru ukoliko postavimo ispred optičke rešetke od 80 zareza po milimetru izvor bijele svjetlosti. Učenica Vera_4 jedina je pretpostavila središnju bijelu prugu i dva spektra sa strane. Njezino se očekivanje razlikuje od opažanja po tome što je učenica očekivala samo jedan spektar sa svake strane središnje bijele pruge. Na temelju prošlih zadataka s optičkom rešetkom troje je učenika očekivalo sličnu pojavu na zastoru. Robert_3 očekivao je jednako udaljene bijele maksimume (Slika 6.10) Vertikalno isprekidanu bijelu svjetlost u obliku pravokutnih pruga očekivao je Ronald_3 (Slika 6.11). Alan_3 očekivao je jednako udaljene maksimume kružnog oblika bijele boje, dok je Viktor_5 očekivao maksimume kružnog oblika, ali različitih boja (Slika 6.12).



Slika 6.10: Robert_3, opća gimnazija



Slika 6.11: Robert_3, opća gimnazija



Slika 6.12: Viktor_5, opća gimnazija

Nastanak boja objasnilo je troje učenika pomoću intenziteta svjetlosti:

- *Očito ovdje, pošto je drugačija svjetlost, nije laser nego je obična, jača...*

(Robert_3, opća gimnazija)

- *Poanta rešetke je bila da se zapravo vidi svjetlost u svom punom sjaju, jer bijela svjetlost sadrži sve svjetlosti.*

(Nina_4, opća gimnazija)

Iako su učenici zaključili kako poredak boja ovisi o valnoj duljini svjetlosti i da se bijela svjetlost sastoji od različitih valnih duljina, nitko od učenika nije znao objasniti zašto u sredini vidimo bijelu prugu.

- *Nisam sigurna, ali središnji maksimum je uvijek kao skroz konstruktivna interferencija i onda je nekak' logično da je u sredini skroz bijela i najintenzivnija, a ovdje ...zapravo ne mogu točno objasniti.*

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Mila_5 jedina je spomenula difrakciju u ovom zadatku, ali je definiciju prilagodila pojavi koju je upravo vidjela na zastoru. Boje vidimo zbog difrakcije svjetlosti, koju je definirala na sljedeći način (zamjenjujući je očito s disperzijom svjetlosti):

- *Podjela svjetlosti na boje po valnim duljinama.*

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

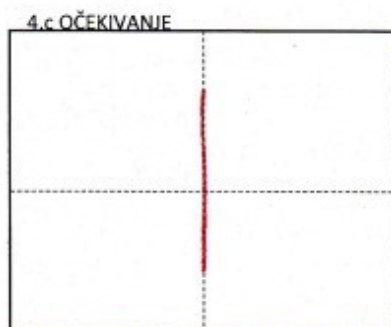
Lisa_3 smatra kako su boje na zastoru nastale unutar rešetke, odnosno da je optička rešetka izvor boja:

- *Pa ja mislim da su čitavo vrijeme bile u toj optičkoj rešetki.*

(Lisa_3, opća gimnazija)

6.3 Ogib na jednoj pukotini

Učenici su najčešće pretpostavili da će na zastoru vidjeti jednu usku liniju (Slika 6.13) ili pravokutnik (četiri učenika od devet) ako laserski snop crvene svjetlosti usmjerimo na pukotinu, zbog toga što je pukotina kroz koju propuštamo svjetlost uska i vertikalna. Jednu lasersku točkicu, manju od punog snopa, očekivalo je troje učenika.



Slika 6.13: Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija

Jedna učenica od devetero ispitanih zaključila je kako na zastoru uočava i ogib i interferenciju te objasnila kako prepoznaje pojedinu pojavu:

- *Mislim ovdje se vidi interferencija i ogib. Ogib prepoznajem po tome što se smanjuje intenzitet prema...znači time što ide dalje, odnosno što su maksimumi udaljeniji od središnjeg maksimuma, to su slabijeg intenziteta, a interferencija zato što ih postoji više, zato što postoji više maksimuma i više minimuma.*

(Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Viktor_5 očekivao je slične maksimume kao u prethodnom primjeru. Svoj zaključak objasnio je preko "savijanja" svjetlosti, odnosno da će se val pri prolasku kroz pukotinu prilagoditi da bi prošao kroz nju, a nakon što prođe, vraća se u svoj prvobitni oblik. Ogib na jednoj pukotini objasnio je i Robert_3, koji je svoje opažanje opisao kao dijeljenje svjetlosti na više dijelova:

- *Pa jedan izvor svjetlosti, kad prolazi kroz manju pukotinu se onda ...svjetlost se dijeli na više manjih dijelova ..*

(Robert_3, opća gimnazija)

- *Pa mora proć nekak...na primjer, ako su uska vrata onda moram se i ja isto nekak na temelju te pukotine, odnosno vrata, moram se nekak napraviti da prođem...isto i svjetlost, ako želi proć kroz to, onda mora val se tak savinut malo.*

(Viktor_5, opća gimnazija)

Robert_3 i Ronald_3 očekivali su manju točkicu, ali nakon što je pokus prikazan, najviše ih je iznenadilo to što je slika horizontalna, a ne vertikalna. Ronald_3 je tu pojavu pripisao lomu svjetlosti:

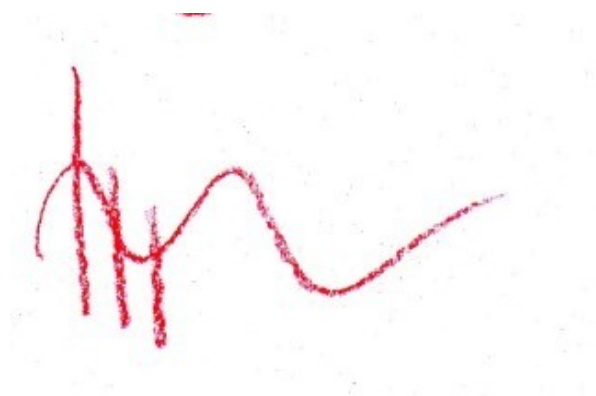
- *Okomito je zapravo... smjer širenja svjetlosti je okomit na pukotinu...Možda se svjetlost lomi.*

(Ronald_3, opća gimnazija)

Osim geometrijske primjene, učenici opet zamišljaju valne fronte, koje udaranjem stvaraju uzorak na zastoru. Viktor_5 i Mila_5, koji znaju što je ogib, i dalje pojavu objašnjavaju preko valnih fronti, Mila_5 vertikalnim linijama označava koji dio vala dolazi do zastora i koji mi vidimo na njemu (Slika 6.14 i 6.15).

- *Ovdje imamo izvor svjetlosti, ovaj prvotni, i onda je pukotina, i onda nakon pukotine ovo je kao zastor s tim da, s obzirom na...i onda zbog toga što se...iz pukotine kreće širiti radijalno i onda mi na zastoru hvatamo samo te neke dijelove...*

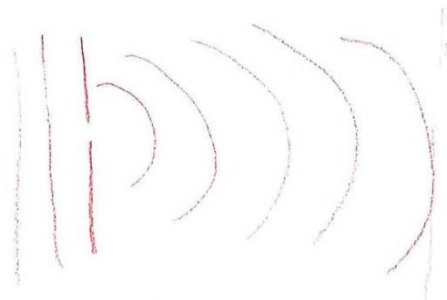
(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)



Slika 6.14: Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija

- *Jedna pukotina, znači imamo ovak val...vjerujem da bi onda išao ovako, da će se ovak širit, širit, širit, širit i onda će udariti u zastor, koji na vrhu ima najveći intenzitet, a ovi sa strane će imat manji.*

(Viktor_5, opća gimnazija)

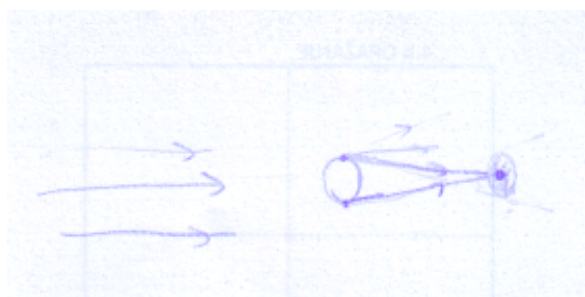


Slika 6.15: Viktor_5, opća gimnazija

Vera_4 i Alan_3 objasnili su pojavu ogibne slike uzimajući u obzir rubove pukotina. Za njih rubovi pukotina postaju novi izvori valova, koji onda interferiraju, Vera_4 svoje objašnjenje popratila je crtežom (Slika 6.16).

- *Svjetlost, kako ima viša zraka, a ne samo jednu, onda dolazi do ovog tu ruba i ovog tu ruba, i sad kak' smo prije zamišljali, tu bi trebala nastajati sjena, ovako nekako, i sad ovaj dio se ne bi trebao vidjeti, ali budući da je svjetlost val, onda ovaj dio djeluje kao novi izvor i zato svjetlost i odavde ide prema tamo, i prema tamo, i prema ovdje, i ovako u ovom tu dijelu, i ako skreće baš na to mjesto ovdje će raditi maksimum i tu će se isto vidjeti svjetlo.*

(Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija)



Slika 6.16: Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija

Učenici su za teorijsko pitanje ogiba svjetlosti na pukotini čija je širina manja od valne duljine svjetlosti, očekivali da valna duljina svjetlosti, koja je veća od pukotine, ne može proći kroz manju pukotinu te su na temelju toga zaključili da na zastoru neće vidjeti ništa.

Petero učenika od devetero smatralo je da valna duljina svjetlosti ne može proći kroz usku pukotinu ili će se podijeliti na više dijelova, što pokazuje da učenici amplitudi svjetlosnog vala pripisuju prostornu dimenziju. Ova je poteškoća ustanovljena i kod

ranih istraživanja istraživačka grupa Sveučilišta u Washingtonu [9].

- *Valna duljina ne može onda proći kroz tu pukotinu, zato što je prevelika za nju, znači neće se propuštati. Neće biti isto sigurno, ali sad ne znam hoće li se propuštati dio te valne duljine, ali mislim da je to nemoguće, mislim neće se ništa vidjeti.*

(Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Troje učenika opće gimnazije nije dalo nikakav odgovor na ovo pitanje.

6.4 Polarizacija

Polarizacijske sunčane naočale u svakodnevnom životu nije susrelo četvero učenika, ali bez obzira na to, svi su učenici znali prepoznati ispravnu fotografiju po tome što na desnoj fotografiji nema odbljeska. Kao prednost polarizacijskih sunčanih naočala pred običnima, troje učenika od devetero navelo je kako ove odbijaju svjetlost, dok je dvoje učenika objasnilo kako polarizacijske sunčane naočale smanjuju količinu svjetlosti ili intenzitet:

- *Pa zato što je puno veći...puno je svjetliji..mi tehnički tu gledamo direktno u Sunce i onda kad gledamo u Sunce, onda imamo više svjetlosti, dolazi do nas tehnički, a ove naočale nam omogućavaju da ne dolazi sad baš sve odjednom nego da se neki dio odbije od sunčanih naočala i onda mi vidimo malo čišću sliku, jer ovdje jedva vidimo auto, na lijevoj slici vidimo jedva auto, a na desnoj slici vidimo jasno auto.*

(Nina_4, opća gimnazija)

- *To je vjerojatno ono kad Sunce...kada se odsjaj od ceste...pa onda...mislim to često zna smetat vozačima, pa onda vjerojatno te naočale smanjuju tu količinu svjetlosti ili da bude lakše pri vožnji.*

(Robert_3, opća gimnazija)

- *Vidio sam po cesti kak se odbija svjetlost i onda kad se odbija ide mu u oči, ali pošto je ovo polarizirano, onda se taj intenzitet smanjuje i onda neće sad biti toliko na oči...*

(Viktor_5, opća gimnazija)

Učenici prirodoslovno-matematičke gimnazije ne znaju u potpunosti objasniti gdje je nestao "odbljesak" i zašto. Na pitanje kamo je odbljesak nestao i kakvu ulogu imaju naočale Mila_5 daje sljedeći odgovor:

- *Pa, zbog toga što je polarizirana, onda se ne stvara odbljesak, ali ne znam di je nestao...svjetlo prolazi kroz naočale prije nego što dođe do našeg oka i onda...ne znam kak da se izrazim... zapravo ne znam kak je točno...*

(Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Pokus s polarizacijskim filtrima vidjelo je u školi samo troje učenika od devetero. Iako su svi učenici na kraju tog dijela intervjua uspješno zaključili koji je od ponuđena dva slajda polarizacijski filter, njih sedmero je zaključivalo na temelju usporedbe. Stavljajući jedan po jedan slajd na izvor svjetlosti, po vizualnoj sličnosti s onim filtrom za koji znaju da je polarizacijski donosili bi svoje zaključke. Samo dva učenika uzela su slajd za koji su znali da je polarizacijski filter, zatim slajd koji ispituju, stavili jedan ispred drugoga i jednoga od njih rotirali. Svi su učenici, nakon postavljenog pitanja da osmisle pokus, zatražili izvor svjetlosti, kao što je svjetiljka ili laser, dok su njih četvero zaključili kako im treba Sunce da bi izveli pokus. Jedan se učenik susreo sa sličnim pokusom u školi:

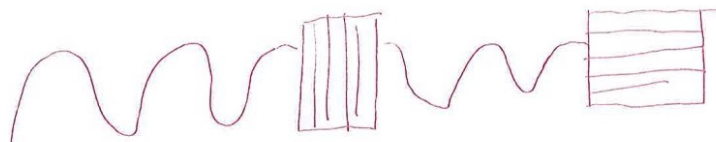
- *Gledanjem...joj...sjećam se kad smo radili s naočalama, dakle kad smo gledali pod kutem od 90, kad su se naočale ovako okretale.*

(Ronald_3, opća gimnazija)

Bez obzira na sličnost pokusa, učenik se odlučio za vizualnu usporedbu slajdova. Općenito, polarizacija je za učenike odbijanje svjetlosti ili smanjenje količine svjetlosti. Viktor_5 (Slika 6.17) i Nina_4 (Slika 6.18) nakon pokusa sa slajdovima objašnjavaju pojavu polarizacije crtanjem polarizacijskog filtra u obliku rešetki. Možemo uočiti kako se pojavljuje poteškoća vezana za smjer širenja svjetlosti i smjer titranja svjetlosti, koja je pronađena i u istraživanju provedenom prošle godine [11].

- *To su te rešetke da može proći taj val i onda kada... i onda ide, ide, ide ovako, valjda, nastavlja se i onda je drugi, ali je on stavljen ovako...i onda svjetlost dalje neće moći dalje proći.*

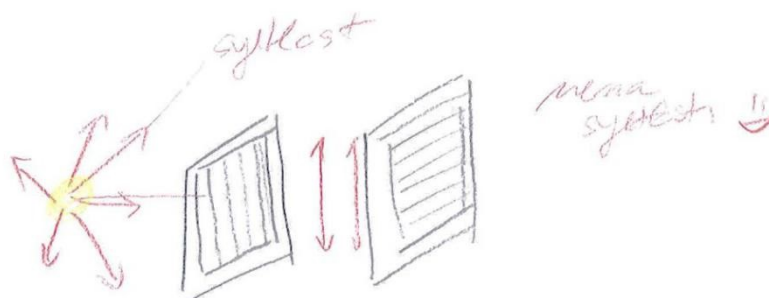
(Viktor_5, opća gimnazija)



Slika 6.17: Viktor_5, opća gimnazija

- *Sad ta svjetlost dolazi tu i tu, sad u svim smjerovima dolazi, ali onda kada tu prolazi, tu će proći k'o polarizirana, a ako ovdje okrenem na drugu stranu, taj dijakozitiv...koji će biti okrenut 90 stupnjeva, to će onda ovako izgledat i onda će mi tu biti, tu će samo prolaziti polarizirana svjetlost, ovako, i onda će se tu odbijati, dalje više neće biti svjetlosti.*

(Nina_4, opća gimnazija)



Slika 6.18: Nina_4, opća gimnazija

Iako je većina učenika čula za polarizaciju svjetlosti, mnogi ne znaju objasniti što je to, pa zaključuju na temelju predloženog pokusa i sastavljaju definicije tako da odgovaraju onome što su malo prije diskutirali i uočili:

- *Polarizacija? Pa rekao bih da je to povezanost sa polarizatorom, kada pod određenim kutom može smanjiti jačinu svjetlosti.*

(Robert_3, opća gimnazija)

- *Polarizacija je pojava u kojoj svjetlost prolazi pod točno određenim kutem kroz ne-kakvu pukotinu i time smanjujući odbljesak i odstranjujući svjetlost koja se širi pod drugim smjerovima.*

(Nina_4, opća gimnazija)

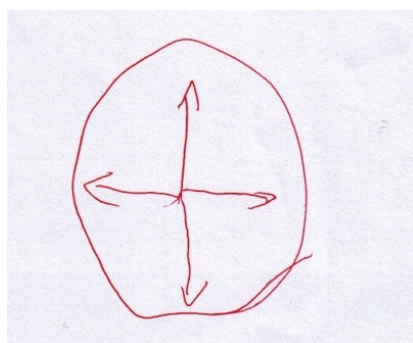
- Čuo sam da...pojma nemam...mogu pretpostaviti u primjeni sad šta je to. . .

(Ronald_3, opća gimnazija)

Memoriziranje određenih objašnjenja bez razumijevanja vidjelo se kod učenika koji je skicirao kako izgleda polarizirana svjetlost (Slika 8):

- Pa znam kako ide oznaka za to...onako krug, strelice idu...jel to to? Jel to ovako bilo, mislim da je, nisam siguran.

(Alan_3, prirodoslovno-matematička gimnazija)



Slika 6.19: Alan_3, prirodoslovno-matematička gimnazija

Strelice koje je učenik nacrtao nije znao objasniti, a objašnjenje za nacrtanu kružnicu bilo je sljedeće:

- Pa jer se širi u svim smjerovima, kao svjetlost.

(Alan_3, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Svjetlost učenici zamišljaju posve različito. Dvoje učenika nisu mogli opisati što je za njih svjetlost dok je kod nekih učenika bio izražen kognitivni konflikt prilikom odgovaranja na pitanje o svjetlosti. Definicija iz škole ne uklapa se u njihov model svjetlosti pa školsku definiciju pokušavaju uklopiti u svoju.

- Pa učili smo da je svjetlost...zapravo su onako više boja povezanih u jednu...to bi bilo kao jedan početak izvora vidljivog u tami ili ne znam kako bi rekao...

(Robert_3, opća gimnazija)

- Ok, dobro, ne znam sad, ako je...ako ide nekak' Sunce, onda recimo da na sunčan dan zamišljam da ide ovako svjetlost, iako znam da ne ide točno tako, ali kao da idu ovako zrake...Budući da znam da je i val i da je ...da nešto to..da znači nešto emitira taj val, onda već u glavi si radim kao da je to zapravo val, zato što mi, ne znam..na primjer, i kad smo radili i interferenciju i sve to, onda uvijek mi to zamišljamo na neki način kao

valove, ali sve u svemu, na kraju ipak radimo sa paralelnim snopovima.

(Vera_4, prirodoslovno-matematička gimnazija)

Svjetlost je s fotonima povezao jedan učenik te objasnio kako se fotoni kreću kroz zrak, odnosno kakva je njihova putanja. Za njega je svjetlost val, koji se sastoji od fotona koji se gibaju po pravcu (ovu poteškoću možemo pronaći i kod istraživanja grupe Sveučilišta u Washingtonu) :

- *Putanja? Pa di je izvor svjetlosti i onda mogu..svako ide onak..mogu ići raspršeno i onda će uvijek biti isto...pratit će kao pravac.*

(Viktor_5, opća gimnazija)

Dvoje od devet učenika nacrtalo je elektromagnetski transverzalni val, gdje su magnetsko i električno polje međusobno okomiti, no niti jedan učenik za objašnjenje polarizacije svjetlosti nije koristio model elektromagnetskog vala.

7 Ključne učeničke poteškoće

Poteškoće otkrivene ovim istraživanjem podudaraju se dijelom s poteškoćama iz ranijih istraživanja, ali su uočene i neke nove. Pojavu tih poteškoća objašnjavamo aktivacijom neprikladnih elemenata zaključivanja i drugih kognitivnih resursa prilikom pokušaja stvaranja objašnjenja pojava u različitim područjima valne optike. Spontano su povezivali i aktivirali nedovoljno razvijene ili čak pogrešne koncepte ili modele koje bi tada pokušavali uklopiti u predstavljeni problem i dati logično obrazloženje. Takav pristup učenici su najčešće primjenjivali kod polarizacije svjetlosti i kod pokusa s optičkom rešetkom i izvorom bijele svjetlosti. Budući da je mali broj učenika uspješno obrazložilo pojavu polarizacije svjetlosti, spontano slaganje obrazloženja dalo se uočiti upravo kod tog pitanja. Naime, nakon što su učenici imali priliku osobno se uvjeriti u primjenu polarizacije svjetlosti u pokusu s polarizacijskim filterima prikladno su prilagodili objašnjenja:

- *Polarizacija? Pa rekao bih da je to povezanost sa polarizatorom kada pod određenim kutom može smanjiti jačinu svjetlosti.*

Isto tako moglo se uočiti kako je pojava spektra na zastoru učenike potpuno iznenadila i potaknula da iskoriste poznate resurse koji su im poznati za optičku rešetku i iskoristili ih za obrazloženje ove pojave:

- *Poanta rešetke je bila da se zapravo vidi svjetlost u svom punom sjaju, jer bijela svjetlost sadrži sve svjetlosti.*

Usporedbom ranijih istraživanja [8, 9] i analizom intervjua potvrđene su sljedeće učeničke poteškoće:

- primjena geometrijske optike u situacijama kad je primjerena valna optika
- tretiranje vala kao objekta
- nepovezivanje svjetlosti s valnim modelom
- pripisivanje prostorne dimenzije amplitudi svjetlosnog vala
- nerazlikovanje polarizacije mehaničkih valova i polarizacije svjetlosti
- nerazumijevanje uvjeta interferencije

- tumačenje ogiba na pukotini samo zrakama svjetlosti s rubova pukotine

Dodatni zadaci i pomoćne metode koje služe za ispravljanje studentskog zaključivanja vezanog uz ogib na jednoj pukotini sastoje se od rastavljanja pukotine na manje pukotine, odnosno točkaste izvore, iz kojih se može zaključiti koji dijelovi pukotine će dati maksimume, a koji minimume. Nakon te metode, učenici imaju mogućnost prepoznati kako geometrijska optika u ovom slučaju ne vrijedi. Ovim su istraživanjem ustanovljene i nove poteškoće, koje nisu prije opažene u istraživanjima:

- očekivanje jednakog broja maksimuma koliko ima pukotina na optičkoj rešetci
- prolazak svjetlosti kroz pregradu između pukotina
- dijeljenje jedne zrake svjetlosti na više zraka prolaskom kroz pukotinu
- stvaranje boja unutar optičke rešetke kad kroz nju propustimo bijelu svjetlost
- stiskanje/širenje vala pri prolasku kroz pukotinu
- nerazumijevanje značenja konstante rešetke

Uočene su i neke općenite poteškoće naših učenika:

- učenje bez razumijevanja
- slabo razumijevanje osnovnih valnih koncepata
- poteškoće u izražavanju
- nepovezivanje matematike i fizike

Može se primijetiti kako učenici imaju poteškoća prilikom izražavanja i sastavljanja rečenica, a mnogi su i odustajali i preskakali zadatke. Svaki učenik izostavio je barem jedno objašnjenje tijekom intervjua. Uočeno je kako ocjene dobivene iz ovog dijela gradiva ne odgovaraju u potpunosti stečenom znanju. Može se uočiti kako učenici poput Viktora_5, Mile_5 i Nine_4 imaju istaknute poteškoće iz valne optike, te su njihovi citati i crteži najviše koristili ovom istraživanju dok ostali učenici (ocjena 3) najčešće nisu ponudili nikakav odgovor na određena pitanja te su kod njih neka pitanja morala biti preskočena. Iako se svaki učenik susreće sa svojim jedinstvenim poteškoćama i pogrešnim zaključcima koji se stvaraju tijekom učenja, sveukupnom analizom mogu se izdvojiti neke tipične ključne poteškoće. Glavne i specifične

poteškoće grupirane su po sljedećim temama: polarizacija, interferencija iz dvaju izvora, optička rešetka i ogib na pukotini. Učestalost poteškoće izražena je brojem učenika kod kojih se poteškoća pojavila barem jednom (Tablica 7.1). Analizom ovog istraživanja nisu utvrđene neke čvrste učeničke miskonceptije, već je potvrđen model aktivacije resursa [7, 10].

Poteškoće	Učestalost	Objašnjenja
<i>1. Polarizacija</i>		
Primjena geometrijske optike u situacijama kad je primjerena valna optika	5/9	Objašnjenje polarizacije pomoću zakona loma svjetlosti. Zrake svjetlosti lome se na polarizacijskom filtru.
Nerazlikovanje polarizacije mehaničkih valova i polarizacije svjetlost	5/9	Smjer titranja svjetlosti učenici interpretiraju kao smjer širenja svjetlosti; tumače polarizator kao mehaničku rešetku
Nepovezivanje svjetlosti s valnim modelom	6/9	Učenici ne poznaju model svjetlosti kao elektromagnetskog vala, već je za njih svjetlost vrsta energije.
<i>2. Interferencija iz dva izvora</i>		
Primjena geometrijske optike u situacijama kad je primjerena valna optika	4/9	Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti učenici primjenjuju na dvije uske pukotine te očekuju na zastoru vidjeti geometrijske slike dviju pukotina kod Youngovog pokusa.
Nerazumijevanje uvjeta interferencije	4/6*	Umjesto računanja razlike hoda, učenici zaključuju na temelju parnosti/neparnosti broja valnih duljina sadržanih u udaljenosti od izvora o kojoj se interferenciji radi i/ili na temelju smjera širenja svjetlosti.
Slabo razumijevanje osnovnih valnih koncepata	5/9	Koncepte poput valne duljine, amplitude i perioda učenici često ne prepoznaju i ne povezuju u primjerima.
Nepovezivanje matematike i fizike	3/9	Strogo odvajanje matematičkih pojmova/simbola od pojmova/simbola u fizici.
Prolazak svjetlosti kroz pregradu između pukotina	1/9	Budući da vidimo maksimum na sredini zastora, svjetlost je morala proći kroz pregradu.

3. Optička rešetka		
Primjena geometrijske optike u situacijama kad je primjerena valna optika	5/9	Pravocrtno širenje svjetlosti učenika navodi na zaključak o broju maksimuma. Koliko zareza sadrži pukotina, toliko ćemo maksimuma vidjeti na zastoru.
Nerazumijevanje značenja konstante rešetke	1/9	Konstanta rešetke za učenike je broj zareza koje rešetka ima, a ne udaljenost između susjednih zareza.
Stvaranje boja unutar optičke rešetke kad kroz nju propustimo bijelu svjetlost	1/9	Optička rešetka izvor je boja, odnosno u njoj se stvaraju boje koje onda vidimo na zastoru.
4. Ogib na pukotini		
Primjena geometrijske optike u situacijama kad je primjerena valna optika	7/9	Očekivanje da će se na zastoru pojaviti jedna vertikalna pruga ili pravokutnik u obliku pukotine.
Pripisivanje prostorne dimenzije amplitudi svjetlosnog vala	4/6*	Kad je pukotina širine manje od valne duljine upadne svjetlosti učenici uspoređuju dimenziju širine pukotine i dimenziju amplitude, te na temelju toga zaključuju da svjetlost neće moći proći kroz pukotinu
Stiskanje/širenje vala pri prolasku kroz pukotinu	1/9	Val svjetlosti koji dolazi do pukotine prilagođava se širini pukotine kako bi prošao kroz nju, ali nakon prolaska, val se vraća u svoj prvobitni oblik.

Tablica 7.1: Popis ključnih poteškoća uz navedenu učestalost. *Troje učenika nije dalo odgovor ili je pitanje preskočeno.

Učenici su određene elemente znanja koristili i pokušavali spojiti u trenutku odgovaranja na pitanje. Polovične definicije i činjenice nastojali su prilagoditi u zadanom problemu kako bi objasnili ono što vide. Takvi elementi znanja nisu nužno pogrešni nego ne odgovaraju zadanom problemu. Aktivaciju resursa uočili smo u većini učeničkih odgovora na pitanja. Tako je poteškoća primjene geometrijske umjesto valne optike posljedica aktiviranja neprikladnog resursa: znanja geometrijske optike i povezanih pojava u situacijama za koje ona nije prikladna, ali koje izazivaju slične asocijacije. Model stiskanja/širenja svjetlosti pri prolasku kroz pukotinu posljedica je aktiviranja iskustva prolaska kroz uska vrata, a povezivanje boja kod optičke rešetke s lomom svjetlosti može se objasniti aktiviranjem prijašnjeg znanja o razlaganju bijele svjetlosti na boje lomom na prizmi. Polarizacija svjetlosti za učenike je vrlo apstraktan pojam, ali mogu je povezati sa svakodnevnim životom (sunčane

naočale) i definicijom predstavljenom u školi. Tijekom našeg istraživanja učenici su svoje konačno objašnjenje često prilagodili trenutno izvedenom pokusu i poznatim dijelovima definicije: *polarizacija je pojava u kojoj svjetlost prolazi pod točno određenim kutem kroz nekakvu pukotinu i time smanjujući odbljesak i odstranjujući svjetlost koja se širi pod drugim smjerovima* (Nina_4, opća gimnazija). Još jedan primjer aktivacije resursa može se vidjeti kod učenice koja je svoje znanje o bijeloj svjetlosti (da sadrži različite valne duljine) primijenila za objašnjenje ogiba na optičkoj rešetci kad kroz nju propustimo bijelu svjetlost. Na pitanje što je to ogib svjetlosti učenica je dala sljedeći odgovor: *podjela svjetlosti na boje po valnim duljinama*. (Mila_5, prirodoslovno-matematička gimnazija). Iz ovog primjera možemo vidjeti kako je učenica aktivirala znanje o disperziji svjetlosti aktivirala, vjerojatno zbog sličnosti naziva difrakcija i disperzija.

8 Zaključak

Cilj ovog istraživanja bio je istražiti učeničko razumijevanje valne optike. Istraživanje je provedeno u obliku polustrukturiranog demonstracijskog intervjua na učenicima četvrtih razreda opće i prirodoslovno-matematičke gimnazije. Nakon analize drugih istraživanja i provedenih intervjua potvrđene su ranije otkrivene poteškoće, ali su otkrivene i neke nove. Mnogi učenici nisu imali priliku u svojim školama vidjeti slične pokuse, pa je ovaj oblik istraživanja pozitivno utjecao na njihovu zainteresiranost za fiziku. Pojave koje su učenici uočili za vrijeme ispitivanja potaknule su njihovu znatiželju i interes za istraživanjem. Još jednom se potvrdilo kako je pokus u nastavi neophodan. Osim što pokusi vode boljem razumijevanju koncepata u fizici vrlo važnu ulogu ima rasprava tijekom izvođenja pokusa. Pokazalo se kako učenici imaju poteškoće prilikom izražavanja i teško im je svojim riječima objasniti svoja razmišljanja. Raspravom u nastavi vrlo lako možemo otkriti njihove pogrešne modele i razvijati njihove komunikacijske vještine. Povezivanje svakodnevnog života s gradivom fizike ima veliku ulogu u daljnjem procesu učenja, no osim toga, smatram da je vrlo važno povezati fiziku s ostalim predmetima. Ovim istraživanjem pokazalo se kako matematika u fizici kod učenika nije samo alat koji olakšava razumijevanje već i alat koji stvara nove poteškoće gdje odvajanjem gradiva matematike i fizike učenici pamte iste matematičke izraze čiju primjenu ne razlikuju i ne povezuju.

Otkrivanjem učeničkih poteškoća možemo prilagoditi i unaprijediti nastavu fizike. Konkretno, u gradivu valne optike posebnu pozornost trebalo bi posvetiti pokusima kako bi učenici imali priliku upoznati i istražiti pojave i formirati kvalitetna objašnjenja. Iako mnoge škole ne posjeduju dovoljno materijala, pokusi iz valne optike mogu se dopuniti i simulacijama i snimljenim pokusima. Raspravom na nastavi možemo uočiti kako učenici razmišljaju i pratiti njihov proces učenja i stvaranja zaključaka i modela. Ovim istraživanjem predstavljena su neka pitanja, problemi i pokusi koji se mogu odmah primijeniti u razredu. Istaknute su ključne poteškoće koje nastavnici mogu iskoristiti kao smjernice za osmišljavanje nastavnog sata, a navedena pitanja mogu se iskoristiti za poticanje rasprave među učenicima.

Dodatak A

INTERVJU

☐ muško
☐ žensko

RAZRED
OCJENA /

DATUM

2.a OČEKIVANJE

2.b OPAŽANJE

3.a OČEKIVANJE

3.b OPAŽANJE

3.c OČEKIVANJE

3.d OPAŽANJE

3.e OČEKIVANJE

3.f OPAŽANJE

4.a OČEKIVANJE

4.b OPAŽANJE

4.c OČEKIVANJE

4.d OPAŽANJE

4.e OČEKIVANJE

4.f OPAŽANJE

4.g OČEKIVANJE

Literatura

- [1] N. Brković: Fizika 3, udžbenik za 3. razred gimnazija. Zagreb: LUK d.o.o. 1999
- [2] Nacionalni kurikulum nastavnog predmeta fizika, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html, 17.06.2019.
- [3] Labor. J: Fizika 3, udžbenik za treći razred gimnazije. Zagreb: Alfa, 2014.
- [4] R. Krsnik, Suvremene ideje u metodici nastave fizike, Školska knjiga (2008.), 42-45,69-75,95-98
- [5] D. A. Norman, Some observations on mental models, in Mental Models, edited by D. Gentner and A. L. Stevens (Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 1983).
- [6] G. Özdemir, D. B. Clark, An overview of conceptual changetheories, Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education (2007), 3(4), 351-361
- [7] D. Hammer, Misconceptions or p-prims: how may alternative perspectives of cognitive structure influence instructional perceptions and intentions? The journal of the learning sciences, (1996), 97-127
- [8] K. Wosilait, P. Heron, P. Shaffer, L. McDermont, Addressing difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light, Am. J. Phys. 67 (1999), S5- S15.
- [9] B. Ambrose, P. Shaffer, R. Steinberg, L. McDermott, An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference, Am. J. Phys. 67 (1999), 146-155.
- [10] B.S. Ambrose: Investigation of student understanding of the wave-like properties of light and matter, University of Washington (1999)
- [11] Zbornik radova XIV. hrvatskog simpozija o nastavi fizike, Zadar, 23.-25.travnja -2019, 98-104.