

**HRZZ PROJEKT IP-2018-01-9085 „UTJECAJ UKLJUČIVANJA ISTRAŽIVAČKIH UČENIČKIH POKUSA U  
SREDNJOŠKOLSKU NASTAVU FIZIKE NA RAZVOJ ZNANSTVENOG ZAKLJUČIVANJA I  
KONCEPTUALNOG RAZUMIJEVANJA (INVESTIGATE)“**

## **METODIČKE UPUTE UZ NASTAVNU SEKVENCU IZ VALNE OPTIKE**

Nastavna sekvenca osmišljena u okviru projekta HRZZ 2018-01-9085 INVESTIGATE osniva se na modelu istraživački usmjerene nastave (1) i rezultatima edukacijskih istraživanja u fizici u tom području, kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj. Osnovna struktura sata novog gradiva s istraživačkim pristupom je sljedeća (2):

- 1) Sat započinje uvodnim problemom, koji daje motivaciju i osnovu za uvođenje učenika u novu temu, po mogućnosti povezuje temu s nekim primjerom iz života ili ponekad stavlja učenike u povijesni kontekst pojedinog problema. Uvodni problem ne mora se razriješiti odmah u uvodnom dijelu sata – često ga ostavljamo otvorenim sve do završnog dijela, kad se opet na njega vraćamo i pokušavamo ga razriješiti pomoću novousvojenog znanja.
- 2) Važan dio uvodnog dijela sata je opservacijski pokus, kojim demonstriramo novu pojavu, bilo pravim pokusom, bilo ponekad simulacijom ili snimljenim pokusom, prema mogućnosti i vrsti teme. Njegova je funkcija da učenici sistematično i pažljivo opaze novu pojavu, stoga je važno pokus izvesti više puta i usmjeriti pažnju učenika na njegove ključne aspekte te usaglasiti opažanja. Nije nužno tražiti uvijek 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.
- 3) Na kraju uvodnog dijela sata, kad su učenici stekli ideju o ključnim aspektima nove pojave ili koncepta, najčešće se uvodi naziv pojave ili koncepta, prema načelu „prvo ideja, onda naziv“(3). Tu je onda najčešće i prilika za stavljanje naslova sata na ploču. Prerano uvođenje naziva sadrži opasnost da se učenici usmjere na novu riječ, a ne vežu uz nju nikakv sadržaj. Bolji je pristup prvo se usaglasiti oko sadržaja, a onda mu dati naziv.
- 4) Središnji dio sata započet će postavljanjem istraživačkog pitanja. Nakon što su učenici upoznali osnovna obilježja nove pojave u uvodnom dijelu, istraživačkim pitanjem specificiramo što nas dalje o toj pojavi zanima, te na koje pitanje želimo odgovoriti svojim istraživanjem. Postavljanje pitanja i njegovo naglašavanje te pisanje na ploču čini učenicima jasnijim što rade i zašto, te ih stavlja u ulogu istraživača. Također, pitanje im omogućava da promisle o načinu istraživanja kojim bi na njega mogli dati odgovor. Važno je prodiskutirati s njima kako bi mogli osmisliti prikladan pokus, što bi mjerili, što držali konstantnim. To sve razvija njihovo znanstveno zaključivanje i uključuje ih aktivnije u nastavni proces.
- 5) Samo istraživanje može se provesti na različite načine, ovisno o raspoloživoj opremi i vremenu. Idealan način bilo bi učeničko istraživanje u malim skupinama od 3-4 učenika, no to neće uvijek biti moguće. Ponekad će se istraživanje ili neki njegov dio provesti frontalno, s cijelim razredom, pri čemu će nastavnik ili netko od učenika izvoditi pokus. U oba je slučaja jako bitno uključiti učenike u proces istraživanja. Za razliku od opservacijskog pokusa, u kojemu očekivanja i pretpostavke o ishodu pokusa nisu uvijek nužna, kod istraživačkog pokusa će najčešće biti nužna. Ponekad će se formulirati i hipoteza koja će se eksplicitno pokusom testirati, na način da se formulira predviđanje ishoda pokusa uz pretpostavku da je hipoteza točna, te se usporedbom opažanja i predviđanja evaluira ispravnost hipoteza. Istraživanje se u iznimnim slučajevima može provesti i pomoću snimljenog pokusa ili simulacije, ali uz njihovo korištenje poput pravog pokusa (daje se opis postava, navodi što će se učiniti, traži od njih da

iskažu/zapišu što očekuju, izvede se pokus više puta, traži da konstatiraju opažanja, potom ih sami zapišu i skiciraju pokus). Moguće je imati i više istraživačkih pitanja u jednom satu, ali tada ih rješavamo jedno po jedno. Na kraju istraživanja se obavezno vraćamo na istraživačko pitanje te učenici na njega odgovaraju na temelju svojih rezultata.

- 6) Često će uz istraživanje ići nastavni listić s pripremljenim pitanjima, koja će voditi učenike u zaključivanju pri istraživanju. U istraživački usmjerenoj nastavi u pravilu ne očekujemo da će učenici posve sami, bez ikakve pomoći, doći do rezultata. To najčešće nije realno obzirom na kratkoću vremena, njihovo neiskustvo i moguće eksperimentalne probleme. Stoga će učenici dobiti dosta vodstva i usmjeravanja od strane nastavnika, te pomoć ukoliko zapnu, vodeći ipak računa o tome da im se ostavi što više prostora za samostalno zaključivanje, te da ta pomoć bude što više u obliku dodatnih pitanja i poticanja na razmišljanje, a manje u obliku gotovih rješenja. Ukoliko je potrebno, nakon istraživanja formirat će učenici zajedno s nastavnikom matematički model nove pojave i analizirati o čemu on govori.
- 7) U modelu sata novog gradiva za završni dio najčešće ne ostaje puno vremena, pa će se završni dio ponekad preletiti i na cijeli sljedeći sat u kojem će se primjenjivati problemski pristup i produbljivati novo znanje i novi model. Ipak, sat novog gradiva svakako treba završiti nekim oblikom provjere razumijevanja. Vremenski najefikasnija su tu konceptualna pitanja s karticama, koja omogućavaju da se dobije odgovor od cijelog razreda u kratkom vremenu. Ako su pitanja dobro odabrana, a distraktori ciljaju na tipične učeničke poteškoće, ovo je i prilika da se neke od tih poteškoća uoče i razriješe. U završnom se dijelu također može razriješiti uvodni problem, ako je bio ostavljen otvorenim, ili diskutirati neke primjene nove pojave u svakodnevnom životu. Moguće je izvesti i aplikacijski pokus u kojem se od učenika traži da primijene novo znanje na neku novu eksperimentalnu situaciju.

#### NASTAVNA SEKVENCA VALNE OPTIKE ZA OPĆU GIMNAZIJU (8 NASTAVNIH SATI)

##### 1. SAT: INTERFERENCIJA SVJETLOSTI IZ DVAJU IZVORA – ANALOGIJA S MEHANIČKIM VALOVIMA

U ovome se nastavnom satu uvodi učenike u valnu optiku upoznavanjem prvog fenomena – interferencije svjetlosti iz dvaju izvora u Youngovom pokusu. Učenike se upoznaje s povijesnim problemom modela svjetlosti, koji će im dati priliku i da razviju važne ideje o prirodi znanosti – kako prosuđujemo koji je znanstveni model bolji? Pokus s loptama i simulacije s valovima pomažu da učenici uoče različitost ponašanja klasičnih objekata (čestica) i valova te zaključite da je upravo interferencija pojava koja ih bitno razlikuje. Tako se dolazi do ideje da bi upravo postojanje ili nepostojanje interferencije svjetlosti moglo presuditi između Newtonovog i Huygensovog modela. Demonstrira se pokus s dvije pukotine kao opservacijski pokus. U ovom pokusu ima smisla tražiti predviđanja, budući ih učenici mogu formirati na temelju geometrijske optike koju su ranije učili, te se kontrastom očekivanja i opažanja postiže uvid u različitost uzorka od onoga što bi predvidjela geometrijska optika (većina učenika očekivat će vidjeti dvije svijetle točke). Ovo je važno, jer istraživanja pokazuju da se učenici i studenti u valnoj optici često pokušavaju vratiti na geometrijsku optiku i pomoću nje objasniti pojave iz valne optike (4, 5, 6). Stoga je dobro odmah od početka, gdje god je moguće, ukazivati na neprikladnost geometrijske optike za objašnjavanje fenomena interferencije i difrakcije. Učenici uočavaju pojavu više maksimuma na zastoru, koji su ekvidistantni. Važno je u prvom susretu demonstrirati čisti interferencijski uzorak, kako bi ga učenici dobro uočili i kako ne bi odmah bili zbunjeni difrakcijskim efektima, koji se na realnim pukotinama često pojavljuju. Da bi se to izbjeglo, koristimo vrlo uske pukotine, koje daju čistu interferencijsku sliku unutar vrlo

širokog prvog ogibnog maksimuma te je to sve što učenici vide za početak (ne vide daljne ogibne maksimume i minimume i nisu odmah njima zbunjeni, te ne moramo ići u diskusiju oko toga).

U središnjem dijelu sata postavlja se istraživačko pitanje kako je opažena slika nastala i je li to interferencijska slika. Učenicima se ne kaže odmah da je to interferencijska slika, nego se želi da oni to istraže pomoću analogije s mehaničkim valovima i polukružnim frontama na folijama, koje su već ranije susreli kod proučavanja mehaničkih valova. Ukoliko zapnu, pomaže im se potpitanjima o tome što u Youngovom pokusu odgovara čemu kod polukružnih valnih fronti. Najviše problema možemo očekivati kod pitanja kako predstaviti zastor na modelu s valnim frontama, a kad to shvate tražiti predviđanje kakav bi uzorak očekivali na zastoru ako se svjetlost širi na isti način kao valovi. Kroz ovo istraživanje oni bi trebali bolje razumjeti formiranje interferencijskog uzorka u prostoru između pukotina i zastora kao i analogiju s valnim frontama, koja se često koristi u raznim pitanjima i zadacima, a učenici je ne razumiju najbolje. To svoje hipotetičko objašnjenje mogu i testirati, predviđajući da bi, ukoliko se svjetlost širi poput valova, trebali dobiti interferencijski uzorak na papiru postavljenom bilo gdje između pukotina i zastora. Na kraju ovog istraživanja učenici bi trebali imati bolje razumijevanje o tome kako se formira interferencijska slika te što ona zapravo predstavlja. Vraćamo se samom pokusu i tražimo tumačenje formiranja maksimuma (svjetlost dolazi u fazi **iz obje pukotine** i pojačava se), ali i minimuma (svjetlost dolazi na to područje zastora **iz obje pukotine**, ali u protufazi i poništava se – dva snopa svjetlosti daju tamu, što je vrlo kontraintuitivno!).

U jednom američkom istraživanju (5) sveučilišni su studenti u velikom postotku implicitno iskazali ideju da je svaka interferencijska pruga povezana samo s jednom pukotinom (geometrijska optika!), jer su očekivali da bi pri pokrivanju jedne od pukotina ipak ostao neki dio uzorka na zastoru, npr. pola uzorka. Da bismo takve probleme izbjegli, naglašavamo povezanost svakog max i min s obje pukotine.

U završnom dijelu sata vraćamo se na uvodni povijesni problem i tražimo od učenika zaključak o modelu svjetlosti koji bolje opisuje eksperimentalne podatke, te se oni sada lako mogu odlučiti za valni model, jer on može objasniti pojavu interferencije svjetlosti, dok čestični model ne može.

## 2. SAT: ISTRAŽIVANJE INTERFERENCIJE SVJETLOSTI IZ DVAJU IZVORA

U ovome satu želimo doći do matematičkog modela kojim ćemo opisati dobiveni interferencijski uzorak i omogućiti učenicima da predvide njegove promjene te vježbaju pritom važno proporcionalno zaključivanje. Iako se formula može matematički izvesti, smatramo da je korisnije za učenike da do nje dođu eksperimentalno te se još više familijariziraju s opaženim uzorkom, uključenim veličinama i njihovim utjecajem na uzorak. Vrlo često je učenicima nejasno značenje pojedinih veličina u formuli, ako se ona samo izvede, dok bi se na ovaj način trebali bolje direktno upoznati sa svim veličinama i njihovim utjecajima. Motivaciju za istraživanje ovisnosti razmaka pruga o drugim veličinama dajemo primjerom interferometra, čime upoznajemo učenike s nekim primjenama pojave interferencije. Opservacijski pokus je ponovno Youngov pokus ili barem projiciranje interferencijskog uzorka dobivenog prošli sat, gdje se još jednom učenici podsjećaju na karakteristike uzorka. Uvodni dio je ovdje kratak, jer je sat na neki način nastavak prethodnoga, a i potrebno je ostaviti što više vremena za učeničko istraživanje.

Prikupljaju se učeničke ideje o tome koje bi sve varijable mogle utjecati na razmak pruga. Ovdje je moguće da učenici osim očitih varijabli poput valne duljine svjetlosti, udaljenosti do zastora i razmaka pukotina uključe i neke druge. Npr. mogli bi pretpostaviti da razmak ovisi i o širini samih pukotina. Ako to predlože, moramo im objasniti da je to izvrsna ideja, ali koja vodi do sasvim nove pojave o kojoj će se uskoro govoriti. U Youngovom pokusu pukotine moramo držati vrlo uskima kako bi se mogle smatrati točkastim izvornima svjetlosti. Ako bismo ih proširili, na uzorku bi se pojavila još jedna pojava (ogib, premda naziv još ne moramo spominjati) i to ne bi više bio samo interferencijski uzorak, stoga u ovom istraživanju širinu pukotine nećemo mijenjati.

Postavljaju se tri istraživačka pitanja, kako razmak pruga  $s$  ovisi o  $\lambda$ ,  $d$  i  $a$ .

Prvu ovisnost ( $s$  o  $\lambda$ ) istražujemo frontalno, jer će učenici u grupama dobiti laser samo jedne boje, a kroz to frontalno istraživanje i diskutiramo s njima o načinu mjerenja razmaka (sredina jedne pruge do sredine druge, uzeti više pruga, pa podijeliti, kako bi se smanjila pogreška). Ovim istraživanjem sa samo dvije boje svjetlosti dolazimo samo do kvalitativne veze (veća valna duljina daje veći razmak među prugama), a učenicima moramo reći da iz toga ne možemo izvući proporcionalnost. Nju su ustanovili fizičari koji su vršili više mjerenja s raznim valnim duljinama svjetlosti. Potom se prelazi na istraživanje u skupinama, a učenicima se podijeli eksperimentalni pribor i listić koji ih vodi kroz istraživanje.

Učenici se u istraživanju mogu susresti s više eksperimentalnih problema, što im pruža priliku za razvijanje eksperimentalnih vještina. Uočavanje proporcionalnosti i obrnute proporcionalnosti u podacima nekima može biti problem, ali svakako je i prilika za utvrđivanje znanja o ovim važnim funkcionalnim ovisnostima. Učenike se potiče da prvo utvrde kvalitativnu ovisnost (npr. udaljavanjem zastora razmak između pruga raste), a potom mjerenjem odrede proporcionalnost. Mnogi učenici ne razumiju dovoljno dobro što znači proporcionalnost, pa će smatrati da je dovoljno utvrditi da se povećanjem jedne veličine povećava i druga. Važno je da uoče stalnost omjera veličina kao potreban kriterij za utvrđivanje direktne proporcionalnosti, a stalnost umnoška kao kriterij za obrnutu proporcionalnost. Kod mjerenja je dobro poticati učenike da u grupi više njih očita istu veličinu, kako bi se uvjerali da netko nije napravio grubu pogrešku, ali i da uoče da će očitavanja možda biti malo različita zbog različite procjene – ukoliko se ne mogu usuglasiti, neka uzmu srednju vrijednost očitavanja. Na taj se način uključuje više učenika u mjerenje, kako ne bi nitko bio posve pasivan. Također ih je dobro uputiti da se mijenjaju pri postavljanju pokusa.

Na kraju sata se diskutiraju dobiveni rezultati grupa, frontalno formira konačna formula i prodiskutira još jednom njeno značenje.

Nakon toga se postavlja nekoliko konceptualnih pitanja, koja idu na primjenu dobivenog izraza i proporcionalnog zaključivanja. Prvo se diskutira primjer jednostruke primjene proporcionalnosti, a potom dvostruke. Dok kod jednostruke ne bi trebalo biti puno problema, posebno nakon što su to cijeli sat istraživali, ali je ipak dobro to provjeriti, kod dvostruke primjene uvijek ima problema. Važno je tražiti obrazloženje odgovora od nekoliko učenika i korigirati eventualno problematične načine zaključivanja (npr. korištenje aditivnog umjesto multiplikativnog zaključivanja za određivanje ukupne promjene). Dvostruku primjenu treba razbiti na dvije jednostruke primjene: razmotriti što se događa pri samo prvoj promjeni, pa onda samo pri drugoj, te ih dovesti do toga da je konačna promjena jednaka umnošku pojedinačnih promjena. Učenici se prije davanja odgovora karticama uvijek trebaju konzultirati s najbližim susjedima, čime se potiče interakcija i njihovo međusobno poučavanje.

### 3. SAT: POVEZIVANJE YOUNGOVOG POKUSA S INTERFERENCIJOM MEHANIČKIH VALOVA I UVJETOM INTERFERENCIJE

U ovome nastavnom satu ponovno povezujemo interferenciju svjetlosti s interferencijom mehaničkih valova. U uvodnom problemu učenike podsjećamo da pojavu interferencije valova na vodi mogu uočiti u svakodnevnom životu, a u opservacijskom pokusu (videu) promatraju dobiveni uzorak na vodi i uočavaju područja poništavanja i pojačavanja valova. To daje motivaciju za razmišljanje o razlogu poništavanja ili pojačavanja na pojedinom mjestu, gdje učenici zaključuju da je to posljedica toga što valovi dolaze u protufazi ili u fazi. Moguće je da učenici neće spomenute ove izraze, jer im oni često nisu jasni, nego će govoriti o tome da se poklapaju brijeg i brijeg ili brijeg i dol, kako bi objasnili pojačanje ili poništenje. Na ovome mjestu imamo priliku razraditi dodatno te pojmove, jer će se oni kasnije koristiti, te pojasniti pomoću skica što znači da su valovi u fazi ili u protufazi, te što je rezultat njihovog zbrajanja u pojedinom slučaju. Bitno je da učenici uoče da se ne zbrajaju samo brijeg i brijeg ili brijeg i dol, nego se zbrajaju sve odgovarajuće točke valova i njihov zbroj rezultira dvostruko većim valom ili mirnom površinom vode u slučajevima valova u fazi ili protufazi.

Kad su ovi pojmovi razjašnjeni, učenike se potiče da se prisjete uvjeta interferencije koji su primjenjivali za mehaničke valove, te ih iskažu matematički i riječima. Važno je poticati iskazivanje zakona i riječima, jer učenici često ne razumiju sam sadržaj matematičkog zapisa, te im iskaz riječima u tome može pomoći. Iako je općenito uvjet interferencije dan kao (7) :

$$\Delta x = x_2 - x_1 = k\lambda, \text{ za konstruktivnu interferenciju } (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = (2k+1) \lambda/2 \text{ za destruktivnu interferenciju } (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

odlučili smo se pojednostavniti ga u skladu s prevladavajućom srednjoškolskom nastavnom praksom, u kojoj se s  $k = 0$  označava središnji maksimum, dok su minimumi s obje strane prvi, drugi, treći itd, te se općenito ne razmatraju negativne vrijednosti  $k$ . Također, ukoliko bi se koristio gornji zapis ne bi postojala simetrija vrijednosti  $k$  za minimume s obje strane središnjeg maksimuma (jedan bi odgovarao  $k = 0$ , a drugi  $k = -1$ ). Kako se obilježavanje maksimuma kao prvog, drugog, itd., bez negativnih vrijednosti, koristi i kasnije kod optičke rešetke, činilo nam se bolje onda odmah uvesti razliku puta  $\Delta x$  kao apsolutnu vrijednost razlike  $x_2 - x_1$ , te zadržati samo pozitivne vrijednosti  $k$ , a vrijednost  $k = 0$  samo kod središnjeg maksimuma. Također je onda transformiran i zapis negativnog broja u  $2k-1$ , kako bi  $k = 1$  dao prvi minimum.

$$\Delta x = |x_2 - x_1| = k\lambda, \text{ za konstruktivnu interferenciju } (k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\Delta x = |x_2 - x_1| = (2k-1) \lambda/2 \text{ za destruktivnu interferenciju } (k = 1, 2, \dots)$$

Ukoliko se u pojedinoj školi ipak koristio općeniti zapis, ne mora se to nužno mijenjati, nego ga se može zadržati, ukoliko nastavnik smatra da je tako bolje i da to ne zbunjuje učenike.

Primjena uvjeta interferencije zahtjevna je čak i za studente (4, 5), pa tu moramo očekivati probleme i kod učenika. Stoga je važno demonstrirati značenje uvjeta interferencije na primjerima valova za nekoliko razlika puta, da bi učenici uočili da razlika puta može, ali i ne mora, promijeniti odnos faza valova (ako se jedan val pomakne za cijeli broj valnih duljina, odnos faza koherentnih valova ostaje isti, ali ako se jedan val pomakne za neparni višekratnik polovice valne duljine, odnos faza se mijenja i ranije valovi u fazi postaju sada valovi u protufazi). Ovo je važno diskutirati, jer učenicima najčešće nije jasna važnost razlike putova, niti zašto je moramo izraziti u valnim duljinama da bismo primijenili uvjet interferencije.

Nastavlja se s tri konceptualna pitanja s karticama, u kojima učenici razmatraju primjere

primjene uvjeta interferencije. Iako se konceptualna pitanja s karticama najčešće koriste u završnom dijelu sata, moguće je koristiti ih i tijekom sata, ukoliko je to potrebno, a ovdje jest, kako bismo se uvjerali da učenici razumiju sadržaj tih uvjeta i znaju odrediti razliku puta. Na slična su pitanja studenti Sveučilišta u Washingtonu odgovorili točno s 35% uspješnosti (5), stoga to nisu trivijalna pitanja za učenike.

Uvodni dio ovog sata je duži nego uobičajeno, zbog toga što sadrži obnavljanje znanja o interferenciji mehaničkih valova, koja su mnogi učenici vjerojatno dijelom već zaboravili. Tek kad smo se uvjerali da se učenici snalaze s uvjetima interferencije kreće se na istraživanje s pitanjem: Kolike su razlike putova svjetlosti od izvora do pojedinih maksimuma i minimuma na slici dobivenoj u Youngovom pokusu? Istraživanje učenici provode u malim skupinama, pomoću polukružnih fronti na listiću kojega dobivaju (prilagođeno prema 8) i slike uzorka iz Youngovog pokusa. Cilj je da interpretiraju interferencijski uzorak po analogiji s mehaničkim valovima, te uoče kako se on formira i koje razlike puta odgovaraju pojedinim maksimumima i minimumima u uzorku sa zastora. Iako se kvalitativno ta veza uspostavila već na prvome satu, ovdje se ona produbljuje i kvantitativno, a daje se učenicima i prilika da primijene uvjet interferencije u kontekstu polukružnih fronti. Korištenjem više reprezentacija i povezivanjem različitih znanja gradimo čvršće i konzistentnije znanje učenika.

Po završenom istraživanju provede se razredna diskusija o dobivenim rezultatima i zajednički odgovori na istraživačko pitanje.

U završnom dijelu sata ne idemo na daljnju primjenu matematičkog uvjeta interferencije u zadacima, nego razmatramo primjenu do sada naučenoga na situaciju Youngovog pokusa s bijelom svjetlošću. Projiciraju se slike Youngovog pokusa s monokromatskom i bijelom svjetlosti. Učenici opažaju razlike, te ih se potiče da pokušaju objasniti pojavu boja i njihov raspored (koja se boja najviše otklanja, a koja najmanje u odnosu na upadni smjer svjetlosti i zašto). Također je važno da zaključe zašto je središnja pruga bijela, što je ujedno i primjena uvjeta interferencije (putovi su jednaki od svakog izvora do središta zastora za valove svih boja, pa se oni tamo ponovno spajaju u bijelu svjetlost). Kratko se spominje i pojava interferencijskih pruga na tankim slojevima (npr. sapunice), jer je to pojava iz svakidašnjeg života, koju su učenici vidjeli, no nažalost nema vremena za njenu dublju analizu.

#### 4. SAT: INTERFERENCIJA SVJETLOSTI NA OPTIČKOJ REŠETCI – ISTRAŽIVANJE

Ovaj se sat fokusira na proširenje pojave interferencije svjetlosti s dvije pukotine na velik broj pukotina (optička rešetka).

Sat počinjemo pitanjem o osvjetljavanju puno pukotina, a ne samo dvije, uvođenjem optičke rešetke, te demonstracijom interferencije monokromatske laserske svjetlosti na optičkoj rešetci. Učenici opserviraju dobiveni uzorak i uočavaju njegovu različitost u odnosu na uzorak iz Youngovog pokusa. Kako istraživanja (9) ukazuju na to da naši učenici imaju poteškoća razlikovati pojedine uzorke iz valne optike, ovdje ih se potiče da usporede ta dva uzorka i uoče sličnosti (ekvidistantni svijetli maksimumi) i razlike (puno veći razmaci među maksimumima, koji su intenzivniji i oštriji kod rešetke, pojava maksimuma pod puno većim kutevima u odnosu na upadni smjer svjetlosti nego kod Youngovog pokusa). Nakon diskusije razloga za pojavu razlika u uzorku, uvodimo nazive središnji maksimum, prvi, drugi,  $k$ -ti maksimum i pojam konstante rešetke  $d$ . S tim pojmom mnogi učenici imaju problema, jer konstantom rešetke smatraju sam broj pukotina po milimetru. Važno je naglasiti da se značenje veličine  $d$  nije

promijenilo od Youngovog pokusa – radi se i dalje o udaljenosti susjednih pukotina, no kod rešetke ta udaljenost ima još i naziv konstanta rešetke. Potom postavljamo istraživačka pitanja: Kako će se slika mijenjati s promjenom broja zareza na optičkoj rešetci? Kakva će biti slika, i zašto, ako umjesto laserske svjetlosti upotrijebimo bijelu svjetlost? Učenici provode istraživanja u malim skupinama uz listić s pitanjima.

Po provedenom istraživanju frontalno se diskutiraju rezultati. Interaktivnim izvodom dolazimo uz pomoć slike do formule za rešetku te pojašnjavamo kroz diskusiju značenje formule i povezujemo dobivene rezultate istraživanja sa samom formulom. Prezentiramo primjere optičke rešetke u tehnologiji i prirodi (CD, DVD, uporaba rešetke umjesto staklene prizme kao elementa koji rastavlja bijelu svjetlost na boje u spektrometrima, strukturne boje u prirodi na krilima leptira i ptica koje su kombinacija efekta optičke rešetke i tankih slojeva).

Sat završava konceptualnim pitanjem s karticama koje potiče bolje razumijevanje formule optičke rešetke.

## 5. SAT: OGIB SVJETLOSTI NA PUKOTINI

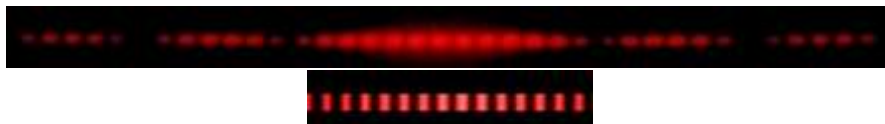
U petome satu uvodimo novu pojavu ogiba svjetlosti na jednoj pukotini. Sat započinjemo uvodnim problemom u kojem postavljamo pitanje što bismo dobili da osvijetlimo samo jednu pukotinu, nakon što smo na prethodnim satima osvijetljavali dvije, pa potom velik broj pukotina. Predviđanja učenika redovito idu u smjeru geometrijske optike (6), te oni očekuju vidjeti osvijetljeno područje na zastoru zbog svjetlosti koja je prošla kroz pukotinu i područje sjene ondje gdje svjetlost ne može proći. Dobro je ova predviđanja prikupiti i skicirati na ploči situaciju koju predviđa geometrijska optika, kako bismo je konfrontirali s kasnijim ishodom pokusa. U ovom opservacijskom pokusu predviđanje je vrlo bitno. Potom izvodimo sam pokus frontalno, osvijetljavajući pukotinu laserskom svjetlosti. Učenici sistematično opažaju i opisuju uzorak koji nastaje – vrlo intenzivan i širok središnji maksimum te niz maksimuma i minimuma s obje njegove strane. Opažanje je dobro skicirati na ploču iznad predviđanja dobivenog pomoću geometrijske optike, kako bi učenici uočili samu bit pojave – ulaženje svjetlosti u područja zabranjena geometrijskom optikom, tj. područja geometrijske sjene. Uvodimo naziv ogib ili difrakcija za ovu pojavu. Jako je bitno sada diskutirati pojavu minimuma i maksimuma na ogibnom uzorku, koji sugeriraju interferenciju svjetlosti, ali gdje su izvori koji je proizvode? Naglašavamo da smo do sada tretirali pukotine kao točkaste izvore svjetlosti, ali u pojavi ogiba je očito da to nije opravdano. Stoga pokazujemo uvećani shematski prikaz pukotine kao niza točkastih izvora te uvodimo Huygens- Fresnelov princip koji kaže da je svaka točka valne fronte točkasti izvor novog vala. Time možemo objasniti da dijelovi valnih fronti svjetlosti iz tih izvora zalaze i u područje geometrijske sjene te se uz određene uvjete pojačavaju ili poništavaju interferencijom, stvarajući maksimume i minimume.

Nakon upoznavanja pojave ogiba postavljamo istraživačko pitanje kako širina središnjeg maksimuma ovisi o širini pukotine. Učenici daju svoje pretpostavke (većinom će očekivati ponovno u skladu s geometrijskom optikom da je središnji maksimum širi kod šire pukotine) te istražuju u malim skupinama uz nastavni listić. Ovo će istraživanje provesti dosta brzo, izmjenjujući tri pukotine različitih širina i opažajući širinu maksimuma. Očekuje se kvalitativna veza – središnji maksimum se širi sužavanjem pukotine.

U općoj gimnaziji nećemo izvoditi matematički opis ogiba na pukotini – to je izraz koji redovito zbunjuje učenike, jer je naizgled suprotan uvjetu interferencije koji je ranije izveden i korišten, no tu valja imati na umu da se uvjet ne postavlja na interferenciju rubnih zraka nego na interferenciju cijelog snopa svjetlosti iz pukotine omeđenog tim rubnim zrakama. Kurikulum

ne predviđa matematički opis ogiba na pukotini u 4x2 programu opće gimnazije (10), stoga se zadržavamo na fenomenološkom i kvalitativnom opisu pojave. Nakon istraživanja, u završnom dijelu postavljamo pitanje o odnosu valne duljine i širine pukotine koja je potrebna za pojavu ogibne slike. Na slično su pitanje američki studenti dali svega 10% točnih odgovora (4, 5). Vrlo je čest slučaj da učenici očekuju da se ogib događa onda kad je valna duljina manja od širine pukotine („svjetlost ne može proći, pa se ogiba“), kako pokazuju istraživanja (4, 5). U istraživanjima je uočeno i da učenici i studenti pripisuju prostorne dimenzije amplitudi svjetlosnog vala i zamjenjuju amplitudu i valnu duljinu (4, 5). Stoga nakon diskusije odgovora na ovo pitanje koristimo simulaciju kao aplikacijski pokus, kako bismo odgovorili na pitanje što se događa s ogibnim uzorkom kad širina pukotine postane jednaka valnoj duljini svjetlosti ili čak manja od nje. Učenici mogu zaključiti da je za pojavu ogibne slike s minimumima i maksimumima potrebno da valna duljina svjetlosti bude veća od širine pukotine, dok će se za slučaj valne duljine manje od širine pukotine pukotina ponašati kao točkasti izvor svjetlosti (prvi minimum nije na zastoru).

Jasno je da je pojava ogiba bila prisutna i u ranijim pokusima s dvije ili mnoštvom pukotina, ali smo držali pukotine vrlo uskima, kako bi funkcionirale što sličnije točkastim izvorima, te kako bismo izbjegli vidljivu pojavu superpozicije ogibne i interferencijske slike. Usporedbu vidimo na slici:



Youngov uzorak s pukotinama koje nisu u režimu točkastih izvora (prva slika) i koje to jesu (druga slika)

Nije nužno ulaziti u ovu raspravu s učenicima, ali se može dogoditi da poneki učenici postave takva pitanja, a nakon ove simulacije i diskusije mogu razumjeti što to znači da je pukotina u režimu točkastog izvora.

Na kraju sata dajemo učenicima priliku da usporede uzorke koje su vidjeli u prethodnim satima – vrlo često ih oni teško razlikuju (9), stoga je važno da ih vide na jednom mjestu i uoče razlike među njima.

## 6. SAT: SISTEMATIZACIJA I RAZLIKOVANJE POJAVA

U šestom satu ne uvodimo nove pojave, nego dajemo učenicima priliku da se snađu u nekoliko pojava koje su uvedene na ranijim satima. Ponovno se kratko otvara pitanje valnog i čestičnog modela i pojava koje su o tome presudile. Eksperimentalni uzorci i matematički opisi pojava se ponovno pojavljuju kako bi učenici uočili sličnosti i razlike. Potom učenici odgovaraju na nekoliko konceptualnih pitanja pomoću kartica. Odgovori se diskutiraju frontalno. Nakon toga učenike dijelimo u male skupine te dobivaju listić sa zadacima, kako bi primijenili matematičke izraze koje su naučili te se pokušali snaći u situacijama koje ti zadaci opisuju. Neki su zadaci standardnog tipa, kakvi se mogu naći u gotovo svim zbirkama zadataka, no neki su nestandardni, npr. inverzni zadatak 2 u kojemu je dan proračun, a učenik mora zaključiti na što se on odnosi. Takvi zadaci potiču malo drugačije razmišljanje od standardnih zadataka u kojem su zadane sve veličine i ono što treba odrediti.

Važno je da učenici rješavaju zadatke u malim skupinama, što se pokazalo iznimno uspješnom interaktivnom nastavnom metodom. Nastavnik kruži razredom i nadzire i potiče rad te pomaže ukoliko neka skupina zapne. Ako sve skupine zapnu na istom mjestu, problem se



diskutira frontalno. Ovakav način rada potiče učenike da uče jedni od drugih, postavljaju pitanja i razviju strategije pristupa zadacima, što se najčešće neće dogoditi pri samostalnom ili rješavanju zadataka na ploči. Nastavnicima pak omogućava uvid u učeničke probleme i daje mogućnost interveniranja.

Ukoliko učenici ne stignu riješiti sve zadatke s listića na satu, ostatak rješavaju za domaću zadaću.

## 7. SAT: POLARIZACIJA SVJETLOSTI

U sedmome se satu uvodi pojava polarizacije svjetlosti. Sat počinje uvodnim problemom o polarizirajućim naočalama, predmetom kojega učenici poznaju iz svakodnevnog života, ali čije funkcioniranje ne razumiju. To će stvoriti motivaciju za upoznavanje nove pojave. Opservacijski pokus s dva polarizacijska filtra na grafoskopu treba izvesti vrlo sistematično, kako bi učenici uočili novu pojavu i uvjete u kojima se događa. Svjetlost grafoskopa se nazove nepolariziranom. Svaki od filtara se prvo postavi samoga na grafoskop i rotira, da učenici uoče da oba djeluju jednako na nepolariziranu svjetlost – smanjuju intenzitet, ali je on neovisan o orijentaciji filtra. Potom se postavi pitanje je li i svjetlost nakon prolaska kroz prvi filter i dalje nepolarizirana te se stave oba filtra jedan na drugoga i rotira jedan pa drugi. Učenici uočavaju veliku promjenu intenziteta prolazne svjetlosti pri rotaciji. Svjetlost koja je prošla kroz prvi filter očito više nije nepolarizirana, jer je učinak drugog filtra na nju drugačiji nego prije – nazivamo je polariziranom. Da bi učenici uočili međusobne položaje filtara pri kojima dolazi do maksimuma ili minimuma prolazne svjetlosti, jedan se filter označi slovom P, a drugi slovom A (polarizator i analizator). Ponovi se pokus pri čemu učenici opažaju položaje pri kojima dolazi do najvećeg intenziteta propuštene svjetlosti (P i A paralelni) i minimalnog intenziteta (P i A ukriženi). Pojavu koju smo opazili nazivamo polarizacijom svjetlosti. Ovdje nismo mogli posve izbjeći uvođenje novog naziva prije upoznavanja pojave, no kako se radi o terminu koji se koristi i u svakodnevnom životu, potrudili smo se dati mu jasnije značenje. Pokus ponovimo i s polarizirajućim naočalama umjesto jednog filtra, kako bi učenici uočili da se i naočale ponašaju na isti način.

Jako je važno pažljivo i sistematično izvesti ove pokuse da bi učenici doista iz njih izvukli ono što želimo. Glavna opažanja potom sistematiziramo.

U središnjem dijelu sata postavljamo istraživačko pitanje o tome što se događa na polarizacijskom filteru te odgovor potražimo analizom analogije s mehaničkim ogradama i valom na užetu. S ovime treba biti vrlo oprezan. Istraživanje koje smo proveli na hrvatskim gimnazijalcima o razumijevanju polarizacije svjetlosti (11) jako je ukazalo na to da učenici pamte analogije i vizualne prikaze koje vide u razredu, ali ih vrlo često krivo interpretiraju. Teško je izbjeći korištenje ove analogije za objašnjenje polarizacije, ali treba imati na umu da je ona vrlo ograničena. U toj analogiji val na užetu već je polariziran, dok je svjetlost koja ulazi na prvi filter bila nepolarizirana. U mehaničkoj analogiji ograda propušta val zato što ima proreze – učenici nerijetko to prenesu na polarizacijski filter, te smatraju da on ima pukotine po sebi, što nije točno, a onda još prenesu analogiju dalje i smatraju svaku pukotinu ili optičku rešetku automatski i polarizatorom (5, 11). U analogiji je mehanička os polarizacije dana smjerom proreza ograde, a propušteni val titra paralelno prorezu. Kod polarizacijskog filtra radi se o dugačkim lancima molekula koje apsorbiraju energiju titranja paralelnog lancima, stoga je os polarizacije okomita na smjer lanaca i propušta se svjetlost koja titra okomito na njih. Jedino što od mehaničke analogije vrijedi zadržati je ideja da svaki filter poput ograde iz

analogije ima jednu os duž koje propušta titranje te ako se dva filtra postave tako da su im osi paralelne svjetlost prolazi, a ako se postave da su im osi okomite, ne prolazi.

Nakon analize mehaničke analogije, učenici mogu zaključiti da je svjetlost transverzalni val. Pomoću simulacije analiziramo što se događa s nepolariziranim valom kad dođe do polarizatora. Odnos smjerova titranja i smjera širenja također je poznata problematična točka u razumijevanju učenika (11). Oni zapamte shematski prikaz „zvjezdice“ koja simbolizira nepolariziranu svjetlost, ali pogrešno zaključuje na temelju toga da se nepolarizirana svjetlost širi u svim smjerovima, a polarizirana samo u jednom (11). Simulacija, kao i mehanički model sa štapom i slikom smjerova titranja, mogu pomoći da to ispravno protumače. Da bismo dovršili pitanje o tome kakav je svjetlost val, moramo razmotriti njegovu prirodu. Ukoliko su učenici ranije već učili o elektromagnetskim valovima, potrebno se pozvati na to i prisjetiti ih da se oni šire brzinom svjetlosti u vakuumu, pa je logičan zaključak da bi i svjetlost mogla biti elektromagnetski val. Ukoliko o tome još nisu učili, potrebno je kratko uvesti osnovnu ideju EM vala (povezana električna i magnetska polja). U oba slučaja zaključujemo da je svjetlost transverzalni EM val čija je os polarizacije određena smjerom titranja električnog polja. Učenicima, pa i studentima, može biti nejasno kako onda svjetlost prolazi kroz polarizacijski filter, koji ima samo jednu os polarizacije. Znači li to da prolazi električno polje, a magnetsko, koje titra okomito na njega, ne? Upravo takve ideje su studenti izrazili u istraživanjima (5). Važno je uočiti da su to međusobno povezana polja, koja generiraju jedno drugo, stoga, ako prođe električna komponenta, proći će i magnetska, a ako ne prođe električna, neće ni magnetska.

U završnom dijelu sata provjeravamo razumijevanje polarizacije kroz nekoliko konceptualnih pitanja s karticama.

## 8. SAT: POLARIZACIJA SVJETLOSTI REFLEKSIJOM

Uvodni problem osmog sata vraća se ponovno na polarizacijske naočale i postavlja pitanje zašto su nam korisne. Na slici koja se projicira mogu uočiti da polarizacijske naočale daju čišću sliku, jer eliminiraju odbleske svjetlosti. Zašto se to događa upravo je istraživačko pitanje na koje ćemo htjeti odgovoriti istraživanjem. Ovo je malo drugačiji tip istraživanja od dosadašnjih, jer postavljamo hipotezu, koju želimo pokusom testirati. Hipoteza je preliminarno objašnjenje neke pojave, a testiranje hipoteza tkz. hipotetičko-deduktivnim zaključivanjem jedan je od osnovnih načina znanstvenog zaključivanja koji se koristi u prirodnim znanostima. Jako ga je važno razvijati, a ovdje možemo vidjeti i jedna primjer kako se to može provesti u razredu. Hipotezu ponudimo učenicima kao moguće objašnjenje: Svjetlost koja se reflektira od nekih površina je polarizirana (zato je polarizirajuće naočale mogu eliminirati). Glavni princip HD zaključivanja je formiranje eksperimentalnog testa za hipotezu, potom predviđanja njegovog ishoda ako je hipoteza točna, provođenje testa, opažanje ishoda i usporedba s predviđanjem. Upravo je ta usporedba ono što nam omogućuje da donesemo neki zaključak o hipotezi: ako je opažanje drukčije od predviđanja, zaključujemo da hipoteza nije podržana. Ako opazimo ono što smo predvidjeli, zaključujemo da je hipoteza podržana. Učenici stoga kroz frontalnu diskusiju osmišljaju eksperimentalni test za hipotezu: osvjetlit će nepolariziranom svjetlošću različite materijale i provjeriti je li reflektirana svjetlost s njih polarizirana, rotiranjem polarizacijskog filtra i (eventualno) polarizirajućih naočala. Potom daju i predviđanje: Ako je hipoteza ispravna (reflektirana svjetlost je polarizirana) i provede se predviđeni eksperiment, očekujemo uočiti promjenu intenziteta reflektirane svjetlosti pri rotaciji polarizacijskog filtra. Ovi se elementi diskutiraju frontalno, jer učenici vjerojatno nemaju iskustva s testiranjem hipoteza, a vrijeme je ograničeno. Nakon što ova dva elementa zapišu na listić, istraživanje

nastavljaju u skupinama i provode eksperimente, zapisuju opažanja i donose zaključak o hipotezi. Uočavaju da je ona podržana za neke materijale, a za druge ne (metale). Na temelju istraživanja mogu zaključiti da je svjetlost koja se reflektira s nemetalnih površina polarizirana.

To im pomaže da u frontalnoj diskusiji dođu do zaključka o tome zašto nam pomažu polarizirajuće naočale – uklanjaju odbljeske svjetlosti s raznih površina, zato što je ona pri refleksiji polarizirana (naočale uklanjaju odbljeske polarizirane okomito na os polarizacije naočala). Na kraju se još interaktivnim izvedom uvodi Brewsterov zakon, a u završnom dijelu provjeri razumijevanje pomoću nekoliko konceptualnih pitanja.

## ZAKLJUČAK

Ova bi nastavna sekvenca trebala pomoći učenicima da razviju bolje konceptualno razumijevanje osnovnih pojava valne optike, da ih povežu s pojavama iz svakodnevnog života i razviju bolje znanstveno zaključivanje. Ona uzima u obzir rezultate edukacijskih istraživanja provedenih u Hrvatskoj i u svijetu u ovom području te nastoji djelovati na ključne točke utvrđene u tim istraživanjima kod kojih postoji nerazumijevanje. Rješavanje numeričkih zadataka nije u fokusu ove sekvence, premda ga se ona djelomično ipak dotiče. Naša nastavna iskustva pokazuju da je glavni problem pri rješavanju zadataka iz valne optike učeničko nepoznavanje samih pojava i veličina koje su uključene u njihove matematičke opise. Smatramo da će podizanje razumijevanja i poznavanja pojava te familijarizacije učenika sa samim veličinama kroz istraživanja sama po sebi već doprinijeti i njihovom boljem rješavanju zadataka. Ipak, ti se zadaci trebaju, po našem mišljenju, zadržati na jednostavnijoj razini, jer nije razumno očekivati da će učenici kroz osam sati nastave biti spremni za rješavanje kompleksnih zadataka u vrlo zahtjevnom području valne optike. Pojave koje se ovdje susreću vrlo su apstraktne, kontraintuitivne, učenicima nove – ima ih puno, uzorci su slični, a opet različiti, formule su slične, a i različite, stoga ne možemo očekivati previsok stupanj operativnosti u tako kratkom vremenu i za takav broj pojava. Smatramo također da fokus poučavanja fizike u općoj gimnaziji niti ne treba biti na visokoj operativnosti što se zadataka tiče, ali treba doprinijeti znanstvenoj pismenosti i znanstvenom zaključivanju učenika. Nadamo se da će predložena nastavna sekvenca za valnu optiku tome doista i doprinijeti.

## REFERENCE

1. Planinić, M. (2015). Istraživački usmjerena nastava fizike – kako je približiti školskoj zbilji?, *Zbornik XII. hrvatskog simpozija o nastavi fizike*, Zagreb: HFD, 8-15.
2. Jeličić, K., Planinić, M., Sušac, A., Matejak Cvenić, K. (2019) Oblikovanje i priprema istraživački usmjerenog nastavnog sata, *Zbornik XIV. hrvatskog simpozija o nastavi fizike*, Zagreb: HFD, 125 -127.
3. Arons, A. B. (1997): *Teaching introductory physics*. New York, Chichester: Wiley.
4. 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. *American Journal of Physics* 67, 146–155 (1999).
5. Wosilait, K., Heron, P. R. L., Shaffer, P. S. & McDermott, L. C. Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *American Journal of Physics* 67, S5-S15 (1999).
6. K. Matejak Cvenic, L. Ivanjek, M. Planinic, A. Susac, K. Jelicic, M. Hopf and C. Srnka, Exploring secondary school students' understanding of basic phenomena relating to wave optics, *J. Phys. Conf. Ser.* 1929, 12007 (2021).

7. Etkina, Eugenia; Gentile, Michael J.; van Heuvelen, Alan (2014): College physics. A la carte edition. San Francisco: Pearson Education.
8. McDermott, L. C., Shaffer, P. S. Tutorials in introductory physics, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River , NJ, 2002
9. Ana Susac, Maja Planinic, Andreja Bubic, Lana Ivanjek, and Marijan Palmovic (2020) Student recognition of interference and diffraction patterns: An eye-tracking study Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 16, 020133
10. MZOŠ (2019): Kurikulum nastavnog predmeta Fizika za osnovne škole i gimnazije. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019\\_01\\_10\\_210.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html). Kurikulum
11. Karolina Matejak Cvenic, Lana Ivanjek, Maja Planinic, Katarina Jelcic, Ana Susac, and Martin Hopf (2021) Analyzing high school students' reasoning about polarization of light Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 17, 010136