1 Elektromagnetski valovi

Što ću naučiti?

- opisati svjetlost kao val
- objasniti interferenciju svjetlosti
- matematički opisati Youngov pokus
- objasniti ogib svjetlosti
- opisati polarizaciju svjetlosti
- definirati valnu duljinu i frekvenciju vala
- opisati spektar elektromagnetskih valova

Prisjetimo se...

O valovima ponovno

Kroz godine učenja fizike u više smo se navrata sretali s valnim pojavama koje su se javljale u različitim fizičkim situacijama. Valja se sjetiti pojava titranja koje su proizvodile mehaničke valove što su se zatim širili kroz sredstvo poput zraka (zvučni valovi), tla (seizmički valovi), duž žice na gitari itd. Ovdje se okrećemo svjetlosti i svjetlosnim valovima koji imaju mnogo sličnosti s ranije obrađenim mehaničkim valovima. Ipak, svjetlosni valovi pokazuju i niz novih svojstava koja su fizički zanimljiva, ali su i tehnološki važna za razumijevanje i funkcioniranje današnjih modernih tehnologija. Stoga ćemo prvo ponoviti neke osnovne činjenice o valnim pojavama i istaknuti sličnosti i razlike koje donosi nastavak naših istraživanja fizičkih pojava vezanih za valove svjetlosti.

Također se moramo sjetiti i svjetlosnih pojava koje smo razmatrali kroz optičke instrumente poput leća, optičkih prizmi, mikroskopa, dalekozora itd. Tada smo svjetlost opisali kao zraku – pravac duž kojeg se širi svjetlost slijedeći zakone geometrijske optike: prvocrtno širenje zraka svjetlosti, refleksiju zraka svjetlosti, neovisnost snopova zraka svjetlosti i lom svjetlosti. Takav, pojednostavljeni opis svjetlosti sasvim je dobro opisivao pojave u kojima smo računali položaje i veličinu slika koje je davao optički instrument ili optički sustav. U tim situacijama, međutim, nailazili smo na pojave koje su ukazivale da je naše pojednostavljenje ponekad pretjerano i da ne možemo u potpunosti razumjeti baš sve pojave koje se javljaju u optičkim sustavima. Tu dominantnu ulogu imaju pojave razlaganja svjetlosti s pomoću optičke prizme. U tim pojavama naslućivao se pravi karakter svjetlosti, a to je njena valna priroda. Ovdje se spremamo izučiti te pojave, ali nećemo stati na vidljivoj svjetlosti već ćemo ubrzo otići korak dalje i razmotriti, u kasnijim dijelovima ovog poglavlja, cijeli raspon – spektar elektromagnetskih valova u koji pripadaju svjetlosni valovi, a koji, istovremeno, predstavljaju tek (vrlo) mali dio kompletne slike – spektra elektromagnetskih valova.

Podsjetnik na valove

Kada se tijelo mase m giba nekom brzinom v kroz prostor, tada ono ima kinetičku energiju koju može, sudarom ili nekim drugim međudjelovanjem predati nekom drugom tijelu, govorimo o prijenosu količine gibanja i energije gibanjem čestica od mjesta do mjesta, kao da čestica nosi energiju sa sobom. Međutim, prijenos energije može se ostvariti i bez gibanja – premještanja čestica u prostoru. Valovi su primjer takvog prijenosa energije, a zvučni valovi su najočitiji primjer: čestice zraka lokalno titraju malim amplitudama, a zvučni val – signal – poremećaj, odnosno zvučna se energija prenosi stotinama metara, bez prostornog gibanja zraka. Nema “vjetra”, zrak globalno miruje, tek lokalno titra pa se nakupine čestica zraka zgušnjavaju i razrjeđuju, a energija se prenosi. Tako i definiramo val kao poremećaj koji se širi u prostoru, a koji prenosi energiju i količinu gibanja.

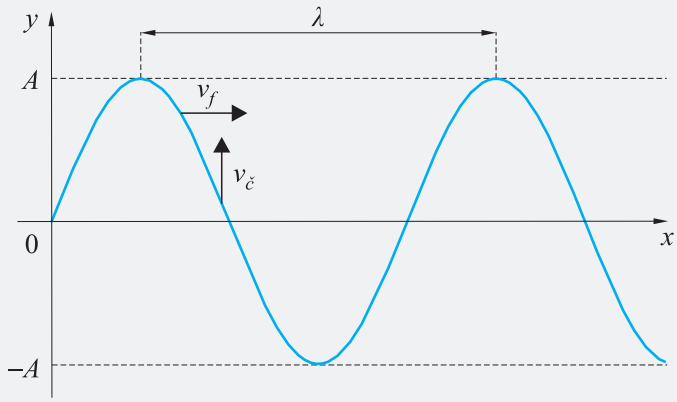
Primjeri takvih valova su valovi na vodi, zvučni valovi, valovi na užetu, seizmički valovi, valovi u stupcima zraka, valovi u štapovima. U svim sredstvima koja prenose valove, odnosno koja su nositelji valova, imamo lokalno gibanje čestica sredstva. Ta se gibanja mogu odvijati u smjeru širenja vala pa govorimo o longitudinalnim valovima, a mogu se odvijati i okomito na smjer širenja vala pa govorimo o transverzalnim valovima. Svi gore navedeni valovi trebaju nositelja vala čije se čestice lokalno gibaju pa govorimo o mehaničkim valovima. Nadalje, može se dogoditi da se valovi međusobnim djelovanjem prestanu širiti kada dođu u neko područje prostora pa govorimo o stojnim valovima, za razliku od progresivnih valova koji se šire sredstvom nositeljem. U čvrstim tijelima mogu se širiti longitudinalni i transverzalni valovi. Prema tome, valove možemo prema gore navedenim svojstvima podijeliti na longitudinalne i transverzalne, na progresivne i stojne, na mehaničke i nemehaničke. Ova zadnja podjela uvodi nas u područje valova koji se sami izgrađuju, koji ne trebaju nositelja. Takvi su valovi svjetlosti i valovi tvari, a naš je zadatak istražiti takve valove.

Opis valova riječima daje nam mentalnu sliku i razumijevanje valnih gibanja, ali zadaća fizike ide dalje: želimo dati matematički zapis valnog gibanja da bismo mogli kvantitativno istraživati valne pojave. Zato je dobro istražiti valove koji nastaju periodičkim poremećajima. Oni vode do matematičkog zapisa vala u kojem se javljaju osnovne veličine što opisuju val: amplituda vala A, fazna brzina vala v_f, frekvencija vala f ili ν, valna duljina λ, period T, valni broj k, faza vala ϕ, energija vala E itd. Od ranije znamo da se gornje veličine koje karakteriziraju val javljaju u sljedećem izrazu:

$$y(x,t) = A\sin(kx - \omega t).$$

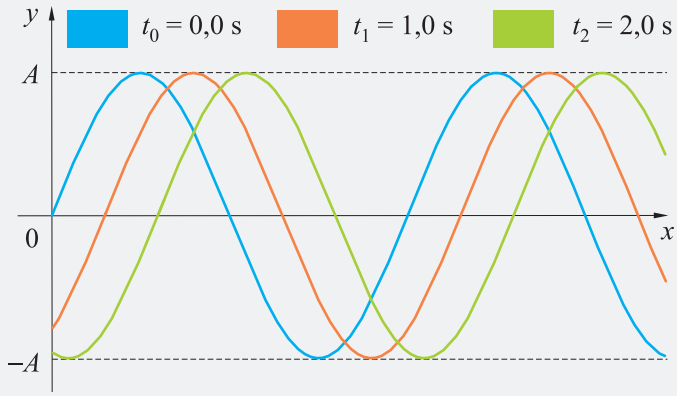
Gornji zapis odgovara harmonijskom transverzalnom valu koji se širi duž osi x u pozitivnom smjeru, a čestice sredstva titraju okomito na smjer širenja, u smjeru osi y. Pri tome je A amplituda vala, a pomak čestice sredstva u y-smjeru zove se elongacija, ω je kružna frekvencija vala i ona je jednaka $\omega = 2\pi f$. Nadalje, faza vala jednaka je $\phi = kx - \omega t$, gdje je k valni broj jednak $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$. Brzina, ili točnije fazna brzina, kojom se širi val jednaka je $v_f = f\lambda$, i vrijedi sljedeća veza između frekvencije i perioda $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi}$. Važno je sjetiti se da je (fazna) brzina širenja vala v_f različita od brzine titranja pojedinih čestica sredstva. One svojim titranjem oko ravnotežnog položaja proizvode (progresivni) val: čestice u slučaju transverzalnog vala titraju u y-smjeru, a val – njegova faza $\phi = \omega t - kx$ širi se brzinom v_f u smjeru osi x. Kod longitudinalnog vala čestice titraju oko svojeg ravnotežnog položaja u smjeru širenja vala. Brzinu čestice pronašli bismo tako da izračunamo omjer njenog pomaka (u y-smjeru) Δy i vremena Δt koje je potrebno da čestica prijeđe taj pomak: $v_{\check{c}} = \dfrac{\Delta y}{\Delta t}$. Čestica je pobuđena na titranje sa zakašnjenjem u odnosu na susjednu koja već titra, pa kažemo da postoji razlika faza između susjednih čestica sredstva.

Na slici 1.1 prikazan je progresivni, harmonijski (sinusni) transverzalni val u trenutku $t = 0$. Razmak između dvaju brijegova vala (ili dvaju dolova) jednak je valnoj duljini λ. Brzina čestice $v_č$ sredstva koje prenosi val (uže primjerice) ima u odabranoj točki smjer nagore, dok (fazna) brzina vala v_f pokazuje u smjeru širenja vala.



Sl. 1.1. Prikaz sinusnog vala $y(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$ *u* $t = 0$

Na slici 1.2 prikazan je progresivni val u tri trenutka: t_0, t_1 i t_2. Valja uočiti da se val giba duž osi x nadesno, a relativni predznak između prostorne varijable x i vremenske varijable t jest negativan. Za fazu $kx + \omega t$ dobili bismo gibanje vala u negativnom smjeru osi x. Fazna brzina vala v_f pokazuje da se tom brzinom giba faza vala $\phi = kx - \omega t$.



Sl. 1.2. Prikaz sinusnog vala $y(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$ *u* $t_0 = 0{,}0\,s$, *u* $t_1 = 1{,}0\,s$ *i u* $t_2 = 2{,}0\,s$

Konceptualni zadatak 1. Val je opisan izrazom $y(x,t) = 1{,}00 \cdot 10^{-4} \sin(60{,}0t + 2{,}00x)$, gdje su sve veličine zadane u jedinicama SI. Tada vrijedi (četiri su točna odgovora):

a) brzina širenja vala je $30{,}0\,\mathrm{ms}^{-1}$

b) valna duljina je π metara

c) frekvencija je $\dfrac{30{,}0}{\pi}$ Hz

d) kružna frekvencija vala je $120\,\mathrm{s}^{-1}$

e) amplituda vala je $1{,}00 \cdot 10^{-4}$ m.

Konceptualni zadatak 2. Val koji se širi u pozitivnom smjeru x-osi ima zapis: $y(x,t) = 0{,}005\cos(\beta x - \alpha t)$, gdje su sve veličine u sustavu SI. Ako je valna duljina vala jednaka $0{,}08\,\mathrm{m}$, a period je $2{,}0\,\mathrm{s}$, tada su α i β jednaki (u odgovarajućim jedinicama):

a) $\alpha = 2{,}0\pi\,\mathrm{s}^{-1}$ i $\beta = 25\pi\,\mathrm{m}^{-1}$

b) $\alpha = \pi\,\mathrm{s}^{-1}$ i $\beta = 2{,}0\,\mathrm{m}^{-1}$

c) $\alpha = \pi\,\mathrm{s}^{-1}$ i $\beta = 25\pi\,\mathrm{m}^{-1}$

d) $\alpha = 25\pi\,\mathrm{s}^{-1}$ i $\beta = 2{,}0\pi\,\mathrm{m}^{-1}$.

Konceptualni zadatak 3. Tri jednadžbe opisuju tri transverzalna mehanička vala

1. $y(x,t) = 2{,}00\,\mathrm{m}\cos[(5{,}0\,\mathrm{m}^{-1})x - (2{,}0\,\mathrm{s}^{-1})t]$
2. $y(x,t) = 3{,}00\,\mathrm{m}\cos[(6{,}0\,\mathrm{m}^{-1})x - (3{,}0\,\mathrm{s}^{-1})t]$
3. $y(x,t) = 1{,}00\,\mathrm{m}\cos[(7{,}0\,\mathrm{m}^{-1})x - (2{,}0\,\mathrm{s}^{-1})t]$.

Poredajte valove prema iznosima njihovih brzina, od najmanjeg do najvećeg iznosa:

a) 1., 2., 3., **b)** 3., 1., 2., **c)** 3., 2., 1., **d)** 2., 3., 1.

Podsjetnik na trigonometriju

Ovdje navodimo niz relacija između različitih trignometrijskih funkcija, a te relacije važne su za matematičku formulaciju valnih odnosa koje ćemo istraživati.

$$\sin(x \pm y) = \sin(x)\cos(y) \pm \cos(x)\sin(y)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \mp \sin(x)\sin(y)$$

$$\sin(-x) = -\sin(x) \quad \text{(neparna funkcija)}$$

$$\cos(-x) = \cos(x) \quad \text{(parna funkcija)}$$

$$\cos(2x) = \cos^2 x - \sin^2 x = 2\cos^2 x - 1 = 1 - 2\sin^2 x$$

$$\sin(2x) = 2\sin x\cos x$$

$$\sin(\pi - x) = \sin x \qquad \cos(\pi - x) = -\cos x$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \cos x \qquad \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = \sin x$$

$$\sin x \pm \sin y = 2\sin\left[\frac{1}{2}(x \pm y)\right]\cos\left[\frac{1}{2}(x \mp y)\right]$$

$$\cos x + \cos y = 2\cos\left[\frac{1}{2}(x + y)\right]\cos\left[\frac{1}{2}(x - y)\right]$$

$$\cos x - \cos y = -2\sin\left[\frac{1}{2}(x + y)\right]\sin\left[\frac{1}{2}(x - y)\right]$$

Vrijednosti za mali x (u radijanima):

$$\cos x \simeq 1 - \frac{x^2}{2} \simeq 1, \qquad \sin x \simeq x - \frac{x^3}{6} \simeq x, \qquad \mathrm{tg}\, x \simeq x + \frac{x^3}{3} \simeq x.$$

1.1. Uvod

Izučavajući električne i magnetske pojave, vidjeli smo da pri prolasku električne struje kroz vodič nastaje magnetsko polje, a da promjene magnetskog polja ili, točnije, promjene magnetskog toka stvaraju električnu struju. Pojednostavljeno ćemo reći kako električna struja proizvodi magnetizam, a magnetizam proizvodi električnu struju. Pritom je važno da se i električno i magnetsko polje mijenjaju u vremenu. Ako konstruiramo uređaj ili sklop koji neprestano – mnogo puta u sekundi – ponavlja takve promjene električnih i magnetskih polja, tada dobivamo elektromagnetske valove koji se šire prostorom i koji se sastoje od vremenskih promjenljivih električnih i magnetskih polja, a ta se polja međusobno izgrađuju i tako se šire prostorom. Brzina promjena tih polja ili njihova frekvencija ovisi o konstrukciji uređaja pa možemo govoriti kako proizvodimo spektar elektromagnetskih valova. Iz širokog spektra elektromagnetskih valova, o kojima je ranije bilo govora, sada se posvećujemo relativno uskom području, malom rasponu frekvencija, odnosno valnih duljina. Međutim, taj djelić spektra daje nam možda najvažniji doživljaj vanjskog svijeta, omogućuje nam da vidimo svijet oko sebe jer naše su oči svojom funkcijom izabrale upravo taj djelić spektra i pružaju nam vizualnu vezu s prirodom, s drugim ljudima, sa svemirom i s mikrosvijetom. Ali, pjesničko divljenje svjetlosnim pojavama nije svrha ovog poglavlja. Ovdje želimo istražiti kako se činjenica da je svjetlost (elektromagnetski) val odražava na pojave koje ne možemo razumjeti i objasniti ako svjetlost promatramo kao zraku koja, prošavši kroz malu pukotinu, pada na zastor.

Sl. 1.3. Dio spektra elektromagnetskih valova. Spektar nema oštre granice, nego se proteže dalje na obje strane.

Trebalo je proći poprilično vremena dok fizičari nisu shvatili i eksperimentalno potvrdili kako svjetlost doista jest val. Naime, svjetlost se teorijski objašnjavala primjenom klasične ili Newtonove mehanike. Pokušalo se svjetlosne pojave objasniti i razumjeti mehanikom, kao da je svjetlost nakupina malih čestica – korpuskula. Odgovarajuća mehanička teorija svjetlosti nazvana je korpuskularna teorija svjetlosti. Međutim,

pokusi koje je oko 1803. godine izveo T. Young (poznat i po istraživanju egipatskih hijeroglifa i jedan od najobrazovanijih ljudi tog razdoblja) nedvosmisleno su pokazali da je svjetlost val jer se nijedan rezultat pokusa nije mogao objasniti drukčije, nego valnom prirodom svjetlosti. Tako je prevladala valna (undulatorna) teorija svjetlosti. Moderna istraživanja, posebno početkom 20. stoljeća pokazala su da svjetlost moramo s mnogo opreza tretirati u različitim situacijama: fotoefekt, izbacivanje elektrona iz metala zbog svjetlosti koja pada na metal pokazuje da opisujući svjetlost kao val ne možemo objasniti rezultate eksperimenta. To je dovelo do objašnjenja svjetlosti, ponovno, čestičnom predodžbom. Određene nedoumice o pravoj prirodi svjetlosti razriješene su tek uvođenjem dualne teorije koja dopušta opis svjetlosnih pojava jednim i drugim pristupom.

Prihvatit ćemo i primijeniti valni opis svjetlosti kako bismo mogli ranije usvojene koncepcije o valovima (interferencija, refleksija, valna duljina, frekvencija, brzina, amplituda) proširiti i shvatiti niz pojava vezanih za valove. Razumijevanjem tih pojava jedna od najvažnijih grana primijenjene fizike postaje valna ili fizička optika. Možemo to vidjeti na primjeru izučavanja zvijezda (njihove građe, temperature, evolucije i završne faze) jer sve saznajemo mjereći i analizirajući svjetlost koja od njih dolazi k nama. Fizička optika nam omogućuje spektralnu analizu te svjetlosti, omogućuje prepoznavanje vrste atoma koji emitiraju tu svjetlost, a na taj način saznajemo građu pojedine zvijezde jer, kao što ćemo naučiti, svjetlost koju zrači pojedini atom, njegov je “otisak prsta”. Slična je situacija u istraživanjima materijala u tehnici, tehnologiji, umjetnosti i forenzici, gdje sadržaj neke komponente materijala saznajemo analizom svjetlosti koju emitira uzorak te komponente, a analiza svjetlosti u potpunosti pripada tehnikama proizašlim iz fizičke optike.

Čekaju nas, dakle, primjene znanja interferencije valova na interferenciju svjetlosti, čeka nas difrakcija i određivanje intenziteta svjetlosti na izuzetno važnom uređaju, optičkoj rešetci. Posebno je zanimljiva pojava polarizacije svjetlosti koja nastaje zbog toga što je svjetlost transverzalni val. I primjena polarizirane svjetlosti je tehnički i tehnološki važna jer može npr. ukazati na pojave naprezanja u materijalima, odnosno pokazati gustoću pojedinih organskih tvari u otopini, što je važno u medicinskoj dijagnostici (šećerna bolest i sl.).

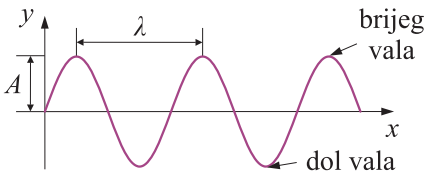
Pogled u učenje

U ovom uvodnom dijelu istraživanja valnih pojava više nego ikad se prisjećamo znanja koja smo stekli ranije. Vidimo da se javlja neprestano povezivanje različitih aspekata istih pojava ili istih aspekata različitih pojava. Ta međupovezanost fizičkih pojava čini fiziku zanimljivom, uzbudljivom, privlačnom, ali ponekad i teškom jer moramo neprestano biti u mogućnosti sveukupno ranije stečeno znanje povezati s novim spoznajama. Ipak, ovdje je važno istaknuti da to nije samo slučaj s fizikom već i s nizom drugih (prirodnih) znanosti i matematikom: stečena znanja valja uvijek “imati u pripremi” i moći ih u svakom trenutku aktivirati i primijeniti. Jedino tako možemo potpuno sigurno i s potpunim razumijevanjem pomicati granicu našeg znanja prema nepoznatom.

Ključni pojmovi

- Youngov pokus
- difrakcija
- optička rešetka
- polarizacija
- linearna polarizacija
- Brewsterov zakon
- Brewsterov kut
- elektromagnetski val
- elektromagnetski spektar
- radiovalovi
- mikrovalovi
- infracrveno zračenje
- vidljiva svjetlost
- ultraljubičasto zračenje
- rendgensko zračenje
- gama-zračenje
- Maxwellove jednadžbe
- oscilator
- antena

Sl. 1.4. Interferencija valova na vodi



Sl. 1.5. Značajke vala su: amplituda A i valna duljina λ.

1.2. Svjetlost kao val

Svjetlost je transverzalni val i elektromagnetski val. Istražit ćemo koje se nove činjenice javljaju u vezi sa svjetlosnim pojavama i koja je objašnjenja nekih pojava moguće dati kad svjetlost tretiramo kao val.

Potrebno se prisjetiti općih svojstava transverzalnih valova, a to su refleksija, refrakcija, interferencija, difrakcija i polarizacija. Pokusi s valovima na vodi, prikazani na slici 1.4, pokazuju sve te aspekte valnog gibanja, a oni su prisutni i kod valova svjetlosti.

Matematički zapis vala zahtijeva dvije varijable: položaj (jer se val širi u prostoru) i vrijeme (jer se u nekoj danoj točki val mijenja u vremenu). Promatrat ćemo harmonijske valove, matematički prikazane na slici 1.5, gdje je elongacija y, koja predstavlja električno polje vala svjetlosti, prikazana u ovisnosti o položaju. Vidimo da je istaknuta valna duljina λ, kao i amplituda A.

Naučili smo napisati matematički zapis harmonijskog vala u obliku

$$y(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \Delta\phi)$$

gdje je A amplituda vala, k je valni broj ili iznos valnog vektora, ω je kružna frekvencija, a $\Delta\phi$ je fazni pomak (koji vrlo često stavljamo da je jednak nuli). Smjer gibanja vala je u $+x$-smjeru, a valno titranje zbiva se u y-smjeru, dakle, okomito na smjer širenja pa govorimo o transverzalnom valu. Za opis svjetlosnog vala uvest ćemo oznaku $A \to E_0$, pa je sada E_0 amplituda električne komponente svjetlosnog vala, koji je zapravo elektromagnetski val (istražit ćemo to malo kasnije) i $y(x,t) \to E(x,t)$, što nam daje zapis transverzalnog svjetlosnog vala, točnije njegove električne komponente

$$E(x,t) = E_0\sin(kx - \omega t).$$

U optici smo naučili da se svjetlost u sredstvu indeksa loma n širi brzinom $v = \dfrac{c}{n}$ (a indeks loma je uvijek veći od 1). Fazu vala $\phi = kx - \omega t$ možemo napisati na više različitih načina:

$$\begin{aligned}\phi = kx - \omega t &= \frac{2\pi}{\lambda}x - 2\pi f t\\ &= 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot(x - \lambda f t)\\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(x - vt) = k\left(x - \frac{\omega}{k}t\right)\end{aligned}$$

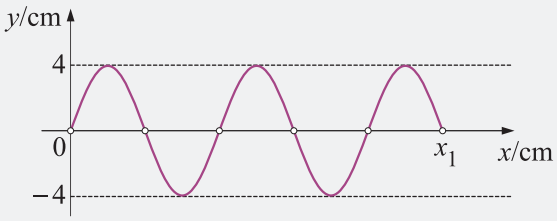
gdje smo uveli brzinu v širenja svjetlosnog vala u sredstvu

$$v = \lambda f = \frac{c}{n} = \frac{\lambda_0}{n}f = \frac{\omega}{k},$$

a λ_0 je valna duljina u vakuumu, tako da je valna duljina λ svjetlosnog vala u sredstvu reducirana za indeks loma n, tj. $\lambda = \dfrac{\lambda_0}{n}$ i $c = \lambda_0 f$. Frekvencija svjetlosti ne mijenja se pri prijelazu iz sredstva u sredstvo.

Zadatci 1.2.

1. Grafički je prikazano valno gibanje u nekom trenutku. Ako je zadano $x_1 = 2{,}5$ cm, kolika je valna duljina?



2. Transverzalni val opisan je funkcijom:

$$y(x,t) = 0{,}02\ \mathrm{m} \sin\left[2\pi(0{,}5\ \mathrm{m}^{-1}x - 10\ \mathrm{s}^{-1}t)\right].$$

Odredite brzinu širenja vala, valnu duljinu, frekvenciju i kružnu frekvenciju, smjer širenja te amplitudu vala.

3. Transverzalni val širi se prema zadanoj jednadžbi: $y = 6\ \mathrm{cm} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\ \mathrm{s}^{-1} \cdot t - \frac{\pi}{4}\ \mathrm{m}^{-1} \cdot x\right)$. Kolika je brzina širenja vala?

4. Valna duljina zelene svjetlosti je 560 nm. Izračunajte njezinu frekvenciju.

5. Koju valnu duljinu i frekvenciju ima svjetlost iz prethodnog zadatka kad putuje kroz vodu? Indeks loma vode je 1,33.

6. Svjetlost je elektromagnetski val koji putuje brzinom od $3{,}0 \cdot 10^8\ \mathrm{ms}^{-1}$. Ljudsko je oko najosjetljivije na žutozelenu svjetlost, čija je valna duljina $5{,}45 \cdot 10^{-7}$ m. Kolika je frekvencija te svjetlosti?

1.3. Interferencija svjetlosti i Youngov pokus

Fizičari

Thomas Young (1773. – 1829.) engleski je fizičar, matematičar i liječnik. Dao je mnoge doprinose prirodnim znanostima, posebno u područjima optike, mehanike, fiziologije, ali i filozofije i egiptologije. S četrnaest godina savladao je već trinaest jezika.

Napomena

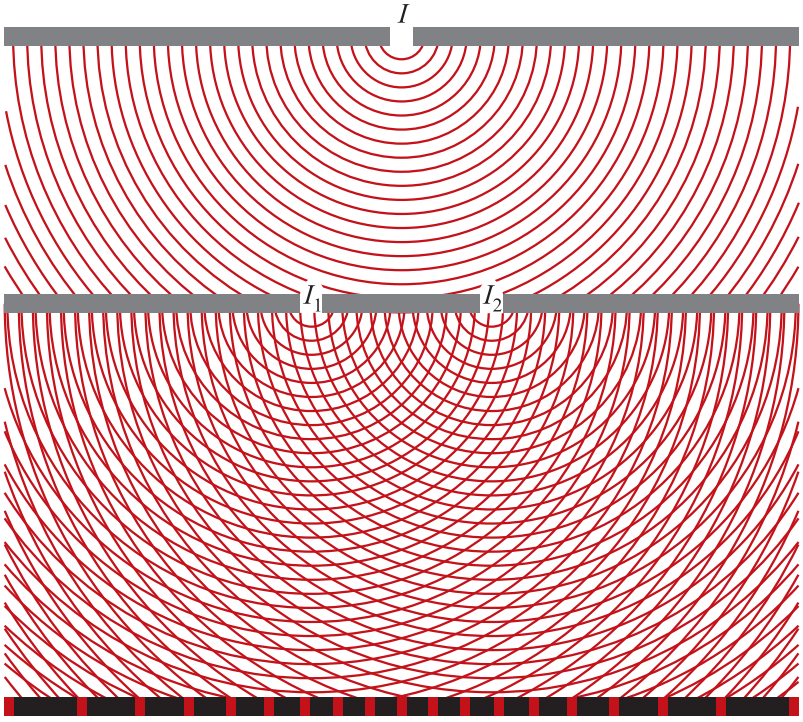
Huygensovo načelo

Pri dolasku fronte (ravnog) vala na dvije pukotine crtamo valove nakon prolaska kroz pukotine kao da u njima "sjede" dva nova izvora valova. Takav način konstrukcije i širenja valova izvire iz Huygensova načela koje smo objasnili u udžbeniku Fizika 3, a koje je tamo primijenjeno na refleksiju i lom svjetlosnih valova. Ponovimo, ukratko, ovdje: svaka točka fronte svjetlosnog vala predstavlja izvor elementarnog (ili sekundarnog) vala koji se širi brzinom vala, a nova valna fronta je ovojnica (ili envelopa) svih elementarnih valova. Tako i ovdje iz pukotina gdje imamo djelić valne fronte izviru elementarni valovi nastali od iste valne fronte (pa je svjetlost koherentna).

Povijesni pokus koji je napravio Thomas Young pokazao je da je svjetlost val. **Youngov pokus** danas se često koristi kao demonstracija interferencije. Pokus je prikazan na slici 1.6. Iz izvora I izlaze valovi svjetlosti, čije su valne fronte nacrtane kako se šire prema dvjema pukotinama I_1 i I_2. Kroz svaku pukotinu prolazi samo mali dio valne fronte, ali nakon toga se stvaraju valovi koji se šire dalje kao da dolaze iz dvaju točkastih izvora. Da bi došlo do zanimljivih pojava vezanih za taj pokus, nužno je da razmak između dvaju izvora bude jako malen, odnosno da bude usporediv s valnom duljinom svjetlosti.

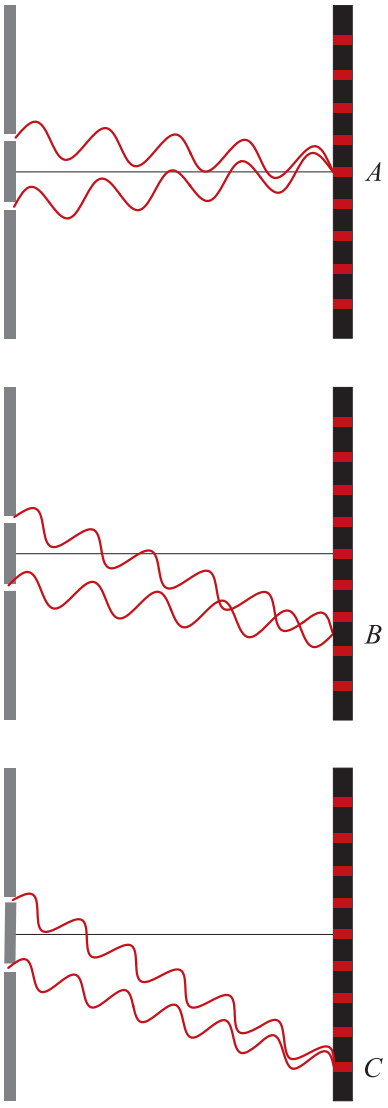
> Youngov pokus je pokus s dvjema pukotinama, a njime se pokazuje pojava interferencije.

Tipični eksperimentalni razmak od I_1 do I_2 je manji od 0,1 mm. Valovi iz pukotina nastali su iz istih valnih fronti pa se ne razlikuju u fazi. Takva dva izvora I_1 i I_2 kod kojih je razlika u fazi stalna ili je nema, kao u našem slučaju, i ne mijenja se u vremenu, emitiraju koherentne valove. U proučavanju pojava interferencije najvažniji je problem dobivanje koherentnih izvora svjetlosti.



Sl. 1.6. Interferencija svjetlosti – dvije pukotine djeluju kao dva točkasta izvora.

Valovi padaju na zastor nacrtan sasvim pri dnu slike. U sredini zastora je udaljenost do pukotina jednaka, nema razlike hoda ni razlike faza pa je sasvim jasno da će se svi valovi koji dolaze na to mjesto pojačati, odnosno da će doći do konstruktivne interferencije.



Sl. 1.7. Svijetle i tamne pruge interferencije. U točki A, kada nema razlike hoda, valovi se zbrajaju i nastaje konstruktivna interferencija, odnosno imamo središnji maksimum. Slično je u točki C, gdje je razlika hoda takva da se valovi opet poklope i pojačaju. U točki B je razlika hoda takva da se valovi poništavaju pa nastaje destruktivna interferencija.

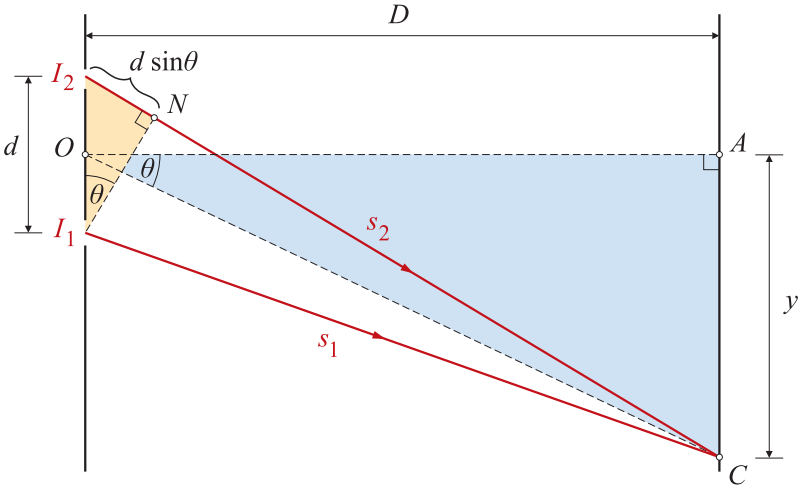
Sl. 1.8. Laser koji se najčešće koristi kao pokazivač.

Kako se danas može izvesti takav pokus? Uz pomoć lasera kao na slici 1.8, koji je moguće povoljno kupiti, dobit ćemo koherentni izvor crvene svjetlosti. Pukotine možemo napraviti tako da crno-bijelim filmom, koji je još uvijek moguće nabaviti u specijaliziranim trgovinama fotografske opreme, fotografiramo prazni komad bijelog papira na kojem smo povukli dvije crne linije, jednu posve uz drugu. Na negativu se na mjestu dviju crnih linija nalaze dvije prozirne linije. Dimenzije negativa su, primjerice, 24 mm puta 36 mm, pa je i razmak među linijama jako malen, što je i potrebno da bi došlo do vidljivih učinaka interferencije. Kada laserski snop pustimo na te dvije linije, pojavit će se pruge interferencije. Točnije, ako rabimo laser crvene svjetlosti, dobit ćemo niz crvenih kružića (maksimumi) između kojih je tama (minimumi).

Kada govorimo o minimumu i maksimumu svjetlosti na zastoru, zapravo promatramo intenzitet vala svjetlosti na zastoru. Ranije smo naučili (a kasnije ćemo se još vratiti na to) da je intenzitet vala proporcionalan kvadratu amplitude vala. Dakle, na mjestu gdje je rezultantna amplituda najveća, vidimo maksimum interferencije. Rezultantni intenzitet nije jednak zbroju intenziteta pojedinih upadnih valova, već se javlja dodatni, interferentni član koji bitno doprinosi maksimumu, odnosno minimumu intenziteta.

Youngov pokus možemo promotriti i na slici 1.9, gdje računamo razliku hoda dviju zraka. Moramo znati da su pukotine dobivene razvijanjem negativa razmaknute oko 0,2 mm (a to je veličina d na slici). Zastor na kojem gledamo minimume i maksimume obično je udaljen dva do tri metra (veličina D na slici). Maksimumi se pojavljuju na udaljenosti od oko 1 cm (veličina y na slici) od središnjeg maksimuma – točka A. Prema tome se duljine s_1 i s_2, a to su duljine puta jednog, odnosno drugog vala svjetlosti, vrlo malo razlikuju. Također je i kut θ na slici vrlo malen. Zato možemo zapisati da je razlika hoda δ, odnosno razlika s_1 i s_2 jednaka

$$s_1 - s_2 = d \sin\theta = \delta.$$



Sl. 1.9. Geometrija Youngova pokusa.

Fizičari

Christiaan Huygens (1629. – 1695.) nizozemski je astronom i fizičar. Otkrio je Saturnove prstenove i maglicu Orion. Znatno je unaprijedio mjerenje vremena, kada je 1656. godine konstruirao prvu uru s njihalom. U kontekstu ovog poglavlja važan je zbog uvođenja valne teorije svjetlosti, kojom je bilo moguće objasniti interferenciju i difrakciju.

Napomena

Jedinica za snagu je vat (W), a jedinica za intenzitet je $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$. Intenzitet je, dakle, jednak energiji ΔE koja u nekom vremenskom intervalu Δt padne na površinu ΔS:

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta S}$$

pa je jedinica za intenzitet i

$$\mathrm{Js^{-1}m^{-2}}.$$

Zanimljivost

O Thomasu Youngu, kojeg spominjemo ovdje u kontekstu otkrića i dokaza da je svjetlost valna pojava, napisana je biografska knjiga pod zanimljivim naslovom: “Posljednji čovjek koji je sve znao”. Taj naslov podsjeća na naziv “renesansni čovjek” što je bio naziv za ljude koji su posjedovali, u vrijeme razvoja europske civilizacije i kulture u pravom smislu riječi, “svo znanje svijeta”. Primjer jednog takvog čovjeka je sigurno Leonardo da Vinci, a među njemu slične možemo staviti i hrvatskog erudita Ruđera Boškovića, koji je živio i djelovao otprilike 300 godina nakon Leonarda. Biografsku knjigu istog naslova dobio je i Enrico Fermi, nuklearni fizičar 20. stoljeća za kojeg se kaže da je ujedinio u sebi genijalnost eksperimentalne i teorijske fizike. G. W. von Leibniz, njemački matematičar 17. stoljeća, koji je istovremeno s Newtonom razvio difrencijalni i integralni račun također je počašćen biografijom istog naslova. Očigledno, biografi samo čekaju još nekoga da ga počaste knjigom istog naslova.

Vidjeli smo da će se valovi pojačavati kada je $\delta = 0$ ili kada je $\delta = \lambda$ ili općenito kada je δ jednak višekratniku valne duljine λ. Dakle, možemo zapisati uvjete maksimuma i minimuma za Youngov pokus interferencije svjetlosti valne duljine λ na dvije pukotine. Maksimumi – svijetle pruge interferencije javljaju se za:

$$d \sin\theta = n\lambda, \qquad n = 0, 1, 2, 3 \ldots$$

To je konstruktivna interferencija. Za $n = 0$ imamo središnji maksimum, za $n = 1$ imamo prvi sporedni maksimum, $n = 2$ daje drugi sporedni maksimum itd.

Minimumi intenziteta događaju se na mjestima gdje je razlika hoda jednaka $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}$ itd.

To je destruktivna interferencija.

Dakle, minimumi – tamne pruge interferencije javljaju se za:

$$d \sin\theta = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \qquad n = 1, 3, 5, 7 \ldots$$

Zanimljivo je pogledati gdje se nalaze minimumi i maksimumi na zastoru, odnosno kolika je za neki maksimum ili minimum udaljenost y prema slici 1.9. To možemo izvesti iz slike, vodeći računa o tome da je kut vrlo malen. Tada je $\mathrm{tg}\,\theta$ približno jednak $\sin\theta$. (Podsjetnik na trigonometriju nalazi se na početku poglavlja.)

Prema slici 1.9 za položaje maksimuma y_M imamo:

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{y_M}{D} \qquad \text{i} \qquad \sin\theta = \frac{n\lambda}{d}$$

i iz $\sin\theta \simeq \mathrm{tg}\,\theta$ dobijemo

$$\frac{n\lambda}{d} = \frac{y_M}{D}$$