DRŽAVNA SMOTRA I NATJECANJE MLADIH FIZIČARA
Trogir, 11.-14. svibnja 2015.

Srednje škole - 4. grupa

1. zadatak (18 bodova)

Dva zrcala dodiruju se duž zajedničkog brida i reflektirajuće ravnine su im nagnute za malo manje od ispruženog kuta. Laserska zraka svjetlosti valne duljine 632nm, koja je okomita na dodirni brid zrcala i u ravnini okomitoj na oba zrcala, upada pod malim kutom dijelom na bliže zrcalo od kojeg se reflektira polovica zrake, a druga polovica zrake reflektira se od drugog zrcala. Te se dvije zrake nakon refleksije preklapaju u određenom prostoru pa dolazi do njihove interferencije i pojave svijetlih i tamnih pruga na zaslonu koji je gotovo okomit na smjer dolaska snopova svjetlosti. Udaljenost zaslona od brida među zrcalima je 2,850m. Da bismo olakšali izračune i izbjegli probleme s teškim određivanjem malih kutova između dvaju zrcala te zrake i zrcala, interferenciju možemo promatrati kao da je posljedica postojanja dvaju virtualnih izvora iza zrcala. Položaj i međusobni razmak dvaju virtualnih izvora odredimo tako što prilikom umetanja sabirne leće žarišne daljine 30cm na udaljenost 2,600m od zaslona dobijemo na zaslonu oštru realnu sliku dvaju virtualnih izvora i središta tih dviju svijetlih točaka međusobno su udaljena 7.7mm.

a) Koliki je razmak središta dvaju susjednih interferencijskih maksimuma (naravno, kad se leća ukloni)?

b) Koliko se ukupno interferencijskih maksimuma vidi na zaslonu kao posljedica specifične geometrije sustava?

2. zadatak (17 bodova)

Svjetleća dioda napaja se izmjeničnim radiofrekventnim naponom frekvencije 50MHz pa je crvena svjetlost valne duljine 632nm koju dioda emitira modulirana tako da se amplituda svjetlosti mijenja u skladu s naponom.

a) Amplitudno moduliranu svjetlost možemo dobiti i superpozicijom dva monokromatska vala različitih i relativno bliskih frekvencija. Dokažite tu tvrdnju i ujedno izračunajte frekvencije tih dvaju svjetlosnih valova te pokažite kolikom brzinom se širi modulacija svjetlosti kroz vakuum!

b) Zraka takve modulirane svjetlosti izlazi iz diode i dolazi do sustava od dva zrcala te se od njih odbija i malo paralelno pomaknuta vraća nazad do detektorske fotodiode koja se nalazi pored svjetleće diode. Fazni pomak između modulacija poslane zrake s diode i primljene zrake na detektoru može se lako mjeriti osciloskopom. Prilikom udaljavanja para zrcala za 1,49m od diode i detektora dolazi do dodatnog faznog pomaka modulacije između poslane i primljene zrake za π. Kolika je brzina svjetlosti određena ovim eksperimentom?

c) Ovakvim postavom može se mjeriti i indeks loma prozirnog sredstva. Komad stakla u obliku kvadra duljine 30cm stavi se na put odlazne zrake i uoči određeni fazni pomak modulacije između poslane i primljene zrake. Potom se staklo ukloni i zrcala udaljavaju od diode i detektora sve dok se ne uoči isti fazni pomak modulacije kakav je bio dok je staklo bilo na putu. Koliki je indeks loma stakla ako je za to zrcala bilo potrebno pomaknuti za 9,3cm?

3. zadatak (18 bodova)

Postoji i sol NaCl koja je radioaktivna, jer u sebi sadrži jezgre ^{22}Na, ali koja ne postoji prirodno, već se dobiva u reaktorima. Vrijeme poluraspada jezgara ^{22}Na je 2,6 godina, i pri raspadu se emitira pozitron. Nastala jezgra je u pobuđenom stanju i ona nakon 3ps emitira γ-foton energije 1,275MeV i prelazi u osnovno stanje. U procesu u reaktoru dobiveno je 15% radioaktivnih ^{22}Na, dok su ostale stabilne jezgre ^{23}Na. Takav NaCl otopi se odmah u vodi i između dva valjkasta komada ispitnog materijala duljina 10cm kapne se tu otopine i pusti neka voda brzo ispari te se valjci spoje tako da je između njih na sredini ostala

radioaktivna sol u čvrstom stanju mase 1μg. Pretpostavite da se fotoni i pozitroni gibaju uglavnom okomito na valjkaste pločice. Na krajeve izvan valjkastih pločica materijala postavljeni su detektori γ-fotona.

a) Napišite jednadžbu reakcije raspada ^{22}Na i izračunajte kinetičku energija pozitrona ukoliko jezgra ostaje na svom mjestu, a poznate su mase jezgre ^{22}Na koja iznosi 21,9944364u i jezgre kćeri u nepobuđenom stanju 21,99138511u. Prosječna masa jezgara Cl je 35,453u i one su stabilne, a stabilnih ^{23}Na 22,9898u.

b) Kolika je aktivnost u početnom trenutku i koliko je vremena potrebno prikupljati podatke da bi se dogodilo 10^9 raspada ^{22}Na?

c) Pozitron putuje kroz materijal efektivnom brzinom koja je 100 puta manja od njegove brzine prilikom nastanka. Pretpostavite da u prosjeku jednom naiđe na nano-šupljinu u istraživanom poroznom materijalu i u toj šupljini se privremeno zadrži te potom nastavi dalje do drugog kraja materijala. Anihilacija pozitrona najčešće se dogodi s elektronom prilikom izlaska iz materijala pri čemu nastaju 2 γ-fotona. Koliko vremena se u prosjeku zadržavaju pozitroni u nano-šupljini ukoliko γ-detektor najčešće bilježi vremenski razmak između dolaska fotona energije 1.275MeV (start-signal mjerača vremena) i 0,911MeV (stop-signal mjerača vremena) od 47ns? Zašto je start-signal navedene energije dobar izbor u ovoj mjernoj metodi?

4. zadatak (17 bodova)

Lasersko hlađenje atoma je učinak pri kojem se atomi razrijeđenog plina usporavaju pomoću laserskog snopa. Energija fotona iz snopa podesi se na nešto nižu vrijednost od energije potrebne za pobuđivanje atoma iz osnovnog stanja u prvo pobuđeno stanje. Tada atom koji se giba ususret fotonu može apsorbirati takav foton, a rezultat je njegovo usporavanje. Nakon toga dolazi do povratka atoma u svoje osnovno stanje. Budući da se atomi u plinu gibaju u svim smjerovima, koristi se više laserskih snopova u različitim smjerovima da bi se sve komponente brzine umanjile te tako dobio plin čiji se atomi gibaju znatno umanjenom brzinom.

Promatrajte atome natrija mase $m=3{,}82\cdot10^{-26}$kg, kod kojih je energija prvog pobuđenog stanja $E=3{,}36\cdot10^{-19}$J iznad osnovnog stanja, a širina tog stanja je $\Gamma=7\cdot10^{-27}$J, što znači da energija može biti u intervalu od $E-\Gamma/2$ do $E-\Gamma/2$. Pri temperaturi 2,3K karakteristična brzina natrijevih atoma u plinu je 50m/s. Pretpostavite da se atom te brzine giba prema snopu svjetlosti.

a) Kolika mora biti valna duljina svjetlosti da bi atom apsorbirao foton?
b) Kolika će biti promjena brzine atoma apsorpcijom fotona?
c) U kojem intervalu mogu biti brzine atoma da bi oni mogli apsorbirati fotone izračunate energije?
d) Nakon koliko vremena se dogodi prijelaz u osnovno stanje te kvalitativno objasnite kako to da je nakon povratka atoma u osnovno stanje i nakon niza takvih procesa ukupna temperatura smanjena!
e) Na koje valne duljine treba podesiti laser kada se na kraju želi doći do 230μK?

Korisni izrazi: $(1+x)^n\approx1+nx$ za $x<<1$

$\sin(\alpha+\beta)=\sin(\alpha)\cos(\beta)+\cos(\alpha)\sin(\beta)$ i $\cos(x)\sin(y)=(\sin(x+y)-\sin(x-y))/2$

Konstante:

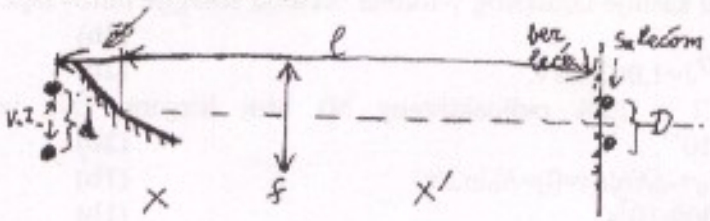
- brzina svjetlosti $c=3\cdot10^8$ m/s
- Planckova konstanta $h=6{,}626\cdot10^{-34}$ Js
- elementarni naboj $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ C
- masa protona $m_p=1.67262178\cdot10^{-27}$ kg
- masa neutrona $m_n=1.67492735\cdot10^{-27}$ kg
- masa elektrona $m_e=9.10938291\cdot10^{-31}$ kg
- unificirana atomska jedinica mase $u=1{,}66056\cdot10^{-27}$ kg

DRŽAVNA SMOTRA I NATJECANJE MLADIH FIZIČARA

Trogir, 11.-14. svibnja 2015.

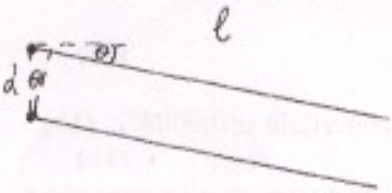
Srednje škole - 4. grupa – Rješenja i bodovanje

1. zadatak (18 bodova)



a) Svako zrcalo stvara jednu virtuanu sliku izvora svjetlosti koje pomoću leće možemo projicirati na zaslon, (slika **(2b)**) pa se iz jednadžbi $\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{1}{f}$ i $\frac{D}{d}=\frac{x'}{x}$ dobiju njihove udaljenosti od leće x i njihova međusobna udaljenost d. **(2b)**

Iz zadanog x'=2,6m i f=0,3m dobije se x=0,339m te potom d=7,7mm·0,339/2,6 = 1mm. **(2b)**



Uvjet za konstruktivnu interferenciju zraka koje se šire iz dva virtualna izvora je $d\sin\theta = k\lambda$, gdje je θ otklon od horizontale. **(2b)**

Položaj k-tog maksimuma na zaslonu udaljenom $l=x+x'$=2,939m od izvora je $z_k = l\tan\theta_k = k\frac{\lambda l}{d}$ jer je θ mali kut pa je razmak susjednih maksimuma $\Delta z = \frac{\lambda l}{d}$=1,85mm. **(3b)**

Ista se rješenja dobiju i kada virtualni izvori nisu točno jedan iznad drugog.

b) Interferencija valova iz dvaju izvora može se dogoditi samo gdje se valovi preklapaju u prostoru, a to je unutar kuta δ. **(2b)**

Iz geometrije je $\frac{d}{2} = s\cdot\tan\frac{\delta}{2}$, gdje je udaljenost izvora od brida zrcala s=0,339m-0,25m=0,089m. Slijedi δ=0,644°=0,01123rad. **(2b)**

S druge strane je $\delta\cdot(l-s) = N\cdot\Delta z$ pa je N=17,3 pa je ukupan broj interferencijskih maksimuma 17. **(3b)**

2. zadatak (17 bodova)

a) Valnu funkciju amplitudno modulirane svjetlosti možemo zapisati $E=E_0\cos(\Omega t-Kx)\sin(\omega t-kx)$, gdje je $\Omega=2\pi F=3{,}14\cdot10^8\,s^{-1}$, a $\omega=2\pi c/\lambda=2{,}98\cdot10^{15}\,s^{-1}$, te $K=2\pi/\Lambda$ i $k=2\pi/\lambda$. **(2b)**

Pomoću formule za umnožak kosinusa i sinusa dobije se

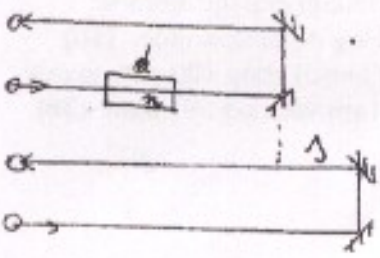
$E=E_0/2\{\sin[(\omega+\Omega)t-(k+K)x]+\sin[(\omega-\Omega)t-(k-K)x]\}$. **(2b)**

Moduliranu svjetlost se dakle može shvatiti kao superpoziciju monokromatskih valova kružne frekvencije $(2{,}98\cdot10^{15}+3{,}14\cdot10^8)s^{-1}$ i $(2{,}98\cdot10^{15}-3{,}14\cdot10^8)s^{-1}$. **(2b)**

Za prvi val vrijedi $\omega+\Omega=c\cdot(k+K)$, a za drugi $\omega-\Omega=c\cdot(k-K)$, gdje je c brzina širenja valova to jest brzina svjetlosti, a oduzimanjem te dvije jednakosti dobije se $\Omega=c\cdot K$, što znači da modulacija također putuje brzinom c. **(2b)**

b) Nakon što je zraka modulirane svjetlosti prešla put $2l$, valna funkcija pri povratku u detektor joj je $E=E_0\cos[\Omega t-K(x+2l)]\sin[\omega t-k(x+2l)]$, što zbog stečenog faznog pomaka modulacije za π s obzirom na modulaciju polazne zrake znači da je $2Kl=\pi$. **(2b)**

Uzimanjem $K=2\pi/\Lambda$ i $\Lambda=c/F$ dobije se $c=4Fl=2{,}98\cdot10^8\,ms^{-1}$. **(2b)**



c) Prilikom prolaska kroz staklo fazni pomak modulacije je nKd. **(1b)**

Uklanjanjem stakla na tom se putu dogodi fazni pomak Kd, kojemu treba nadodati još i fazni pomak zbog pomicanja zrcala za s koji iznosi $2Ks$, te skupa čine isti pomak kao u slučaju stakla. **(2b)**

Stoga je $nKd=Kd+2Ks$. **(1b)**

Slijedi indeks loma stakla $n=1+2s/d$=1,62. **(1b)**

3. zadatak (18 bodova)

a) $^{22}_{11}Na \rightarrow ^{22}_{10}Ne^{*} + e^{+} + \nu_e$ **(1b)**

Jezgra ostaje na mjestu pa se energija dobivena raspadom pretvori u kinetičku energiju pozitrona i energiju pobuđenja jezgre ^{22}Ne koja je za energiju kasnije izračenog γ-fotona veća od energije mirovanja. Stoga možemo pisati $m_{Na}c^2=m_{Ne}c^2+E_\gamma+m_ec^2+K^+$. **(2b)**

Odatle je kinetička energija pozitrona $K^+=1{,}7\cdot10^{-13}$J=1,063MeV. **(2b)**

b) U početnom trenutku u 1μg mase NaCl s 15% radioaktivnog Na broj jezgara ^{22}Na je $N_0=0.15\cdot m/(0{,}15m_{Na22}u+0{,}85m_{Na23}u+m_{Cl}u)=1{,}55\cdot10^{15}$. **(2b)**

Iz $N(t)=N_0(1/2)^{t/\tau}$ dobije se u početnom trenutku $A_0=-dN/dt(t=0)=N_0\ln2/\tau$. **(1b)**

Za zadani $\tau=8{,}205\cdot10^7$s dobije se aktivnost $A_0=1{,}309\cdot10^7$s^{-1}. **(1b)**

Kako je milijarda raspada vrlo mali broj naspram broja jezgara na početku, to se aktivnost može smatrati konstantnom, i broj raspada u vremenu Δt iznosi $\Delta N=A\,\Delta t$, pa je $\Delta t=10^9/1{,}309\cdot10^7$s=76.4s. **(2b)**

c) Iz $K=E-m_0c^2=\dfrac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-m_0c^2$ dobije se $v=c\dfrac{\sqrt{K^2+2Km_0c^2}}{K+m_0c^2}$. **(2b)**

Iz m_0c^2=0,911MeV i izračunatog K dobije se v=0,887c. Brzina pozitrona u materijalu je 0,00887c. **(1b)**

Vrijeme putovanja pozitrona tom stalnom brzinom kroz materijal je 37ns. **(1b)**

Foton je krenuo 3ps kasnije od pozitrona i on stigne za 330ps do detektora, što su zanemariva vremena s obzirom na putovanje pozitrona. **(1b)**

Budući da se dolazak pozitrona bilježi 47ns nakon dolaska γ-fotona, to znači da je pozitron zastao u nano-šupljini 10ns. **(1b)**

Korišteni start-signal je prikladan jer polazi gotovo odmah, jako je velike brzine i usporedive je energije s fotonom nastalim anihilacijom pa se može koristiti isti detektor. **(1b)**

4. zadatak (17 bodova)

a) Atom mase m prije apsorpcije giba se brzinom v ususret fotonu valne duljine λ. Nakon apsorpcije količina gibanja atoma smanjena je na $mv'=mv-h/\lambda$, to jest brzina je smanjena za $\Delta v=-hf/mc$. **(2b)**

Očuvanje energije glasi: $hf-mv^2/2=E-mv'^2/2$, gdje je E razlika energija prvog pobuđenog stanja i osnovnog stanja. **(2b)**

Uvrštavanjem v' iz prve u drugu jednadžbu dobije se $hf(1+v/c)=E-h^2f^2/2mc^2$. Zanemarivanjem $hf/2mc^2$, te za $v<<c$ dobije se $hf=E(1-v/c)=3{,}36\cdot10^{-19}(1-50/300000000)$J, to jest frekvencija je $5{,}071\cdot10^{14}$Hz–$8{,}5\cdot10^7$Hz, pa energija fotona mora biti niža od E za $5{,}6\cdot10^{-26}$J. Valna duljina potrebnog fotona je 591,6nm, to jest točnije za ~0,00001nm viša od toga. **(3b)**

b) Smanjenje količine gibanja atoma jednako je količini gibanja apsorbiranog fotona, pa je promjena brzine $\Delta v=-hf/mc=-0{,}029$m/s. **(2b)**

c) Iz dobivenog izraza $hf(1+v/c)=E$ treba naći u kojem intervalu smije biti brzina atoma, ako je energija prvog pobuđenog stanja u intervalu Γ. Slijedi da je $hfv_t/c=\Gamma$, iz čega se dobije širina intervala brzine $v_t=c\Gamma/hf$=6,25m/s. **(3b)**

d) Iz relacije neodređenosti slijedi da se prijelaz u osnovno stanje dogodi nakon $t=h/\Gamma=1{,}5\cdot10^{-8}$s. **(2b)**

Smanjenje brzine pri apsorpciji puno je manje od intervala u kojem smije biti brzina da bi apsorpcija bila moguća, što govori da će isti atom moći mnogo puta apsorbirati foton te se tako znatno usporiti. Svaki od tih procesa rezultira usporavanjem jedne komponente brzine svakog atoma, a nakon emisije atom se odbija u nasumičnim smjerovima, zbog čega se ukupna kinetička energija cijelog plina smanjuje. **(1b)**

e) Fotoni su i dalje dominantno određeni energijom E, s time da izraz $\lambda=hc/E(1+v/c)$ zbog 100 puta manje brzine nego pri 2,3K (jer je $v^2\sim T$) daje da valna duljina treba biti za 0,0000001nm veća od 591,6nm **(2b)**

DRŽAVNA SMOTRA I NATJECANJE MLADIH FIZIČARA
Trogir, 11. – 14. svibnja 2015.

Srednje škole – 4. grupa

EKSPERIMENTALNI ZADATAK

Pribor:

- plastična posudica
- papirnati ubrus
- stiropor
- 6 čačkalica
- 6 pribadača
- ravnalo
- kutomjer
- milimetarski papir
- voda
- ulje

Zadatak:

1. Odredite indeks loma za vodu i ulje pomoću naznačenog pribora tako da:

I.

a) opišete teorijsku osnovu eksperimentalnog postupka ..... 2 boda
b) napravite odgovarajuću skicu s naznačenim fizikalnim veličinama .... 2 boda
c) napišete izraz za indeks loma i izvedete odgovarajuće izraze za pomak zrake svjetlosti prema skici kao i izraz za pomak zrake svjetlosti koji uključuje i indeks loma ..... 2 boda
d) ukratko opišete način vršenja mjerenja ..... 2 boda
e) tablično prikažete rezultate za minimalno pet mjerenja za vodu ..... 3 boda
f) provedete račun pogreške koji uključuje srednju vrijednost, maksimalno pojedinačno odstupanje, maksimalnu relativnu pogrešku i zapis točnog rezultata. ..... 4 boda

II.

g) ponovite eksperimentalni postupak iz prvog zadatka za ulje uz:
- tablični prikaz rezultata mjerenja ..... 3 boda
- proveden račun pogreške ..... 4 boda
- priložene eksperimentalne papire za vodu i ulje s označenim fizikalnim veličinama koje ste mjerili ..... 2 boda

III.

h) analizirate dobivene eksperimentalne rezultate:
- što sve utječe na preciznost dobivenih eksperimentalnih rezultata .... 2 boda
- ukratko komentirate dobivene rezultate za vodu i ulje u odnosu na teorijske vrijednosti ..... 2 boda
- zaključno navedete o čemu ovisi pomak zrake svjetlosti kroz planparalelnu ploču, te uz fizikalnu skicu komentirate narav slike kroz npr. prozorsko staklo ..... 2 boda

---

Ukupno: ..... **30 bodova**

Natjecateljima želimo uspješan rad!

DRŽAVNA SMOTRA I NATJECANJE MLADIH FIZIČARA
Trogir, 11. – 14. svibnja 2015.

Srednje škole – 4. grupa

Eksperimentalni zadatak - rješenje

1. Odredite indeks loma za vodu i ulje pomoću naznačenog pribora tako da:

I.

a) opišete teorijsku osnovu eksperimentalnog postupka ..... 2 boda

Planparalelnu ploču čine dva međusobno paralelna ravna dioptra, razmaknuta za udaljenost d.

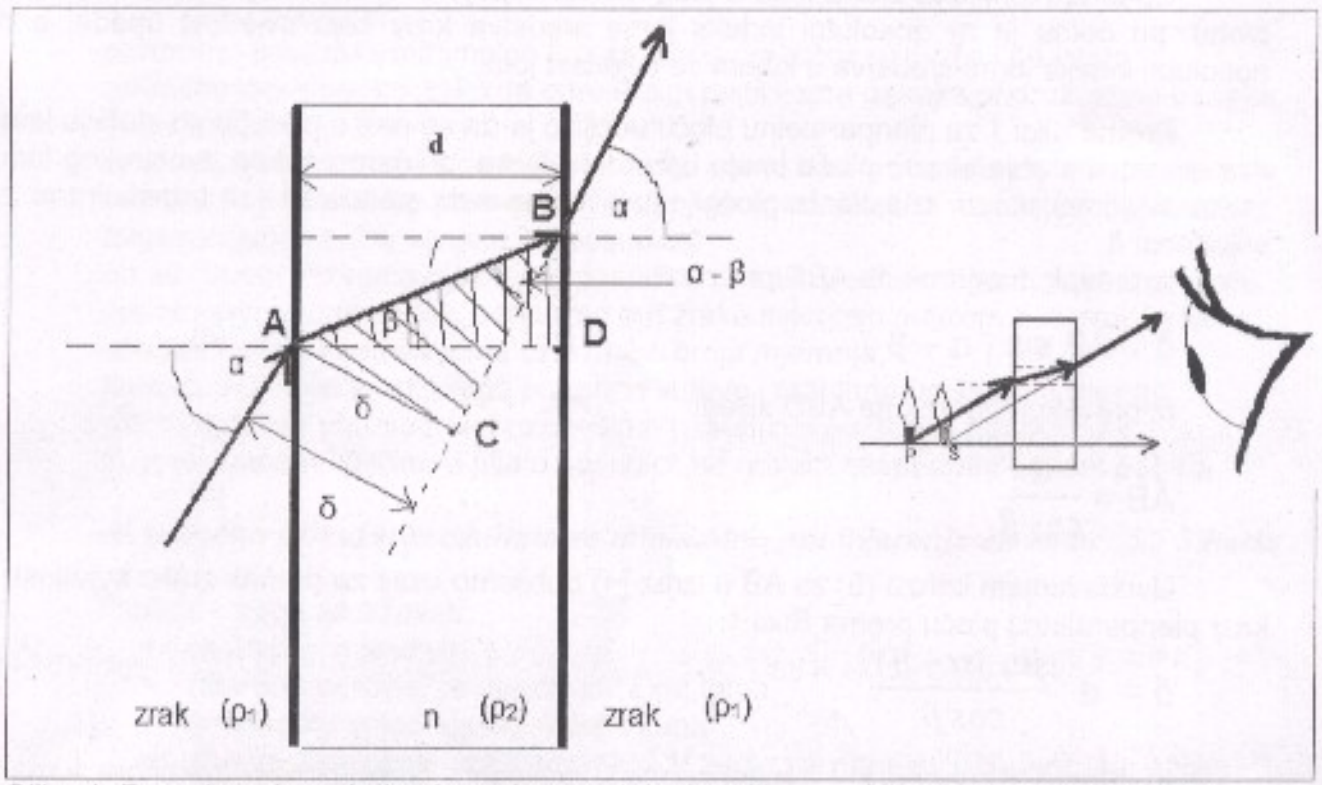
Ravni dioptar predstavlja granicu između dva optički prozirna sredstva različitih indeksa loma n_1 i n_2, međusobno odvojenih ravninom (npr. zrak i voda).

Općenito dioptar smatramo granicom između dva prozirna, homogena, izotropna sredstva.

Na dioptrijskoj plohi koja dijeli dva optički različita sredstva (ρ_1 i ρ_2) svjetlost mijenja pravac širenja. Tu pojavu nazivamo lom ili refrakcija svjetlosti (jedan od četiri osnovna zakona geometrijske optike). Lomljena zraka također leži u upadnoj ravnini i zatvara s okomicom na dioptrijsku plohu kut β. Omjera sinusa kuta upadanja α i sinusa kuta loma β stalan je broj koji nazivamo indeksom loma n, što je poznato kao Snelliusov zakon loma (Willebrord Snellius, 1580.-1626., nizozemski matematičar).

Zraka svjetlosti koja pod nekim kutom dolazi na prvi ravni dioptar iz optički rjeđeg sredstva, lomi se prema okomici, dolazi do drugog ravnog dioptra i tada se ponovno lomi, ovaj put, zbog prijelaza iz optički gušćeg u rjeđe sredstvo, prema okomici, pri čemu su ulazna i izlazna zraka međusobno paralelne i pomaknute za veličinu δ.

b) napravite odgovarajuću skicu s naznačenim fizikalnim veličinama ..2 boda



Slika 1. Pomak zrake svjetlosti na planparalelnoj ploči

Slika 2. Narav slike kroz prozorsko staklo

Osnovne fizikalne veličine koje treba naznačiti na skici: upadni i lomljeni kut, debljina ploče i pomak zrake svjetlosti.

c) napišete izraz za indeks loma i izvedete odgovarajuće izraze za pomak zrake svjetlosti prema skici kao i izraz za pomak zrake svjetlosti koji uključuje i indeks loma ..... 2 boda

Snelliusov zakon loma:

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \qquad (1)$$

Ako je prvo sredstvo vakuum, tada indeks loma nazivamo apsolutnim indeksom loma n. Prema definiciji apsolutni indeks loma vakuuma je jedan. Kad svjetlosna zraka upada iz vakuuma u bilo koje prozirno sredstvo, lomi se prema okomici, odnosno kut loma β uvijek je manji od upadnog kuta α, što znači da je apsolutni indeks loma broj koji je uvijek veći od jedan (n > 1). U obzir treba uzeti kako se upadna zraka na granici dvaju sredstava lomi, ali također i djelomično reflektira po zakonu refleksije. Iz navedenog zaključujemo kako je sredstvo optički gušće što ima veći apsolutni indeks loma.

Ako se lom zrake svjetlosti događa između dva sredstva od kojih niti jedno nije vakuum, tada se indeks loma između ta dva prozirna sredstva naziva relativnim indeksom loma drugog sredstva u odnosu na prvo ($n_{2,1}$). Relativni indeks loma jednak omjeru apsolutnih indeksa loma:

$$n_{2,1} = n_2 / n_1 \qquad (2)$$

Zakon loma možemo napisati i na ovaj način:

$$n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta \qquad (3)$$

Upadna i lomljena zraka leže u istoj ravnini koja je okomita na graničnu dioptrijsku plohu, pri čemu je n_1 apsolutni indeks loma sredstva kroz koju svjetlost upada, a n_2 apsolutni indeks loma sredstva u kojem se svjetlost lomi.

Prema Slici 1 za planparalelnu ploču uočljivo je da se radi o posebnom slučaju kada dva sredstva s obje strane ploče imaju isti indeks loma, pri čemu nakon dvostrukog loma zraka svjetlosti nakon izlaska iz ploče ostaje sama sebi paralelna, ali translatirana za vrijednost δ.

Iz pravokutnog trokuta ABC proizlazi:

$$\delta = AB \sin(\alpha - \beta) \qquad (4)$$

Iz pravokutnog trokuta ABD slijedi:

$$AB = \frac{d}{\cos\beta} \qquad (5)$$

Uvrštavanjem izraza (5) za AB u izraz (4) dobijemo izraz za pomak zrake svjetlosti kroz planparalelnu ploču prema Slici 1:

$$\delta = d\,\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta} \qquad (6)$$

Kut loma β i upadni kut α međusobno su povezani Snelliusovim zakonom loma:

$$\sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n} \qquad (7)$$

Za pomak zrake svjetlosti nakon trigonometrijskih transformacija vrijedi slijedeći konačan izraz u kojem je sadržan i zakon loma:

$$\delta = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \qquad (8)$$

d) ukratko opišete način vršenja mjerenja ..... ***2 boda***

Eksperimentalni set pripremimo na slijedeći način:

- stiropor postavimo na ravnu podlogu stola;
- na stiropor stavimo eksperimentalni milimetarski papir;
- na sredinu papira i stiropora postavimo posudicu koja predstavlja našu eksperimentalnu planparalelnu ploču;
- označimo položaje dva ravna dioptra koji će biti granice dva optička sredstva za primjenu zakona loma (ili cijelu površinu posudice);
- maknemo posudicu, uzmemo eksperimentalni papir i na podlozi stola ravnalom precizno povučemo položaje dva paralelna ravna dioptra;
- vratimo eksperimentalni papir na podlogu od stiropora i na oznake stavimo posudicu koju smo napunili vodom do minimalno 2/3 visine;
- pristupamo viziranju, pri čemu u odabiru imamo pribadače (koje su tanje ali i kraće) i čačkalice (koje su duže i zbog veličine posudice u ovom slučaju praktičnije za korištenje):
    - prvo s jedne strane posudice zabodemo dvije oznake (pribadače ili čačkalice) koje tako čine pravac (zraku svjetlosti) koja dolazi do ravnog dioptra pod kutom α);
    - s druge strane posudice, iza drugog paralelnog ravnog dioptra, u stiropor zabodemo još dvije oznake na taj način da viziranjem kroz jedno oko dobijemo potpuno preklapanje sve četiri oznake (dvije ispred i dvije iza posudice);
- ponovimo postupak minimalno 5 puta, zbog praktičnosti može i na istom milimetarskom papiru, tako da određenim pozicijama oznaka pridružujemo oznake, tj. brojeve;
- za ponavljanje postupka dovoljno je drugu oznaku od posudice pomaknuti za malu vrijednost, pri čemu se povećava ili smanjuje upadni kut, te viziranjem postaviti u odgovarajući položaj oznake iza posudice;
- po završetku mjerenja maknemo posudicu i na eksperimentalnom papiru pomoću pribora ucrtamo okomice, označimo put zrake svjetlosti prilikom dvostrukog loma, upadne kutove i kutove loma uz oznake broja mjerenja;
- pomoću kutomjera izmjerimo potrebne kutove i rezultate upišemo u tablicu;
- zatim papirnim ubrusom dobro osušimo posudicu i postupak ponovimo s odgovarajućom količinom ulja u posudici, na novom eksperimentalnom papiru.

e) tablično prikažete rezultate za minimalno pet mjerenja za vodu .... 3 boda

Tablica 1 treba sadržavati:

- redni broj mjerenja
- mjerene veličine za upadni kut i kut loma
- izračunatu vrijednost za indeks loma
- zbog praktičnosti može se uvrstiti u tablicu ili napisati u drugačijem obliku vrijednost svakog pojedinačnog odstupanja dobivenog rezultata u odnosu na srednju vrijednost (točka f)

- također se može zapisati i dobiveni pomak zrake svjetlosti, ali ta vrijednost nije neophodna za cilj praktičnog zadatka, koji se odnosi na određivanje indeksa loma.

f) ***provedete račun pogreške koji uključuje srednju vrijednost, maksimalno pojedinačno odstupanje, maksimalnu relativnu pogrešku i zapis točnog rezultata.*** ..... ***4 boda***

Srednja vrijednost: $n^* = \Sigma n_i / N$, N – broj mjerenja (9)

Apsolutna vrijednost maksimalnog pojedinačnog odstupanja:

$|\Delta n_{max}|$ ~ prema: $\Delta n = n_i - n^*$ (10)

Relativna maksimalna pogreška: $r_m = [(|\Delta n_{max}| / n^*) \cdot 100]\ \%$ (11)

Zapis točnog rezultata: $n = (n^* \pm \Delta n_{max})$ (12)

II.

g) ponovite eksperimentalni postupak iz prvog zadatka za ulje uz:

- tablični prikaz rezultata mjerenja ..... ***3 boda***

= opisano pod e)

- proveden račun pogreške ..... ***4 boda***

= opisano pod f)

- uz tablice s rezultatima mjerenja priložite eksperimentalne papire za vodu i ulje s označenim fizikalnim veličinama koje ste mjerili .... 2 boda

= opisano pod d) ~ 4., 5., 8. i 10. crtica

III.

h) analizirate dobivene eksperimentalne rezultate:

- što sve utječe na preciznost dobivenih eksperimentalnih rezultata ... 2 boda

= Očekuje se kratak osvrt na način viziranja, mjerenje kutova, oblik posudice.

- ukratko komentirate dobivene rezultate za vodu i ulje u odnosu na teorijske vrijednosti ..... ***2 boda***

= Kratka usporedba eksperimentalnih rezultata u odnosu na poznatu vrijednost indeksa loma za vodu (n = 1,33).

U analizi poželjno spomenuti plastične stijenke posudice, usporediti rezultate za vodu i ulje, odrediti odstupanje u odnosu na poznatu teorijsku vrijednost i sl.

- zaključno navedete o čemu ovisi pomak zrake svjetlosti kroz planparalelnu ploču, te uz fizikalnu skicu komentirate narav slike kroz npr. prozorsko staklo ..... ***2 boda***

= Prema slici 1 i izrazima (6) i (8) logično se može zaključiti kako pomak zrake svjetlosti ovisi o upadnom kutu α, debljini ploče d i indeksu loma n planparalelne ploče.

Slika 2 na 1. stranici prikazuje kako kroz prozorsko staklo vidimo virtualne slike realnih predmeta; slike koje dobivamo planparalelnom pločom virtualne su i bliže ploči nego predmet.

Ukupno: ..... **30 bodova**