

Optika

Optika - Dio fizike. Znanost koja proučava svjetlosne pojave.

Izvori svjetlosti: Sunce, zvijezde, užareni predmeti, plamen, električni izboj u plinovima i dr.

Oko = detektor svjetlosti. Pomoću oka razlikujemo tamu od svjetlosti.

Tama = nedostatak svjetlosti

Što je svjetlost?!

Vrlo težak odgovor!

svjetlost – dvojna priroda: kao **val** i kao **čestica**

Valna teorija - tumači svjetlost kao elektromagnetski val

Ch. Huygens i R. Hooke (17. i 18. st.) - zastupaju valnu prirodu svjetlosti

T. Young (početkom 19. st.) - otkriva pojave difrakcije i interferencije
(A. Fresnel. objasnio pojavu → jedino pomoću valne prirode svjetlosti)

J. Foucault i A. Fizeau mjere brzinu svjetlosti → svjetlost se širi manjom brzinom u vodi nego u vakuumu → u prilog valne teorije

Optika 2

Franjo Petrić (16. st.) - hrvatski filozof i znanstvenik → uzima *svjetlost kao uzrok svega postojećeg* (svjetlost dolazi od Boga, daje i život organskom svijetu, i dr.)

Aristotel → osnovu svemu i početak umovanju uzima *gibanje i Prvog pokretača*.

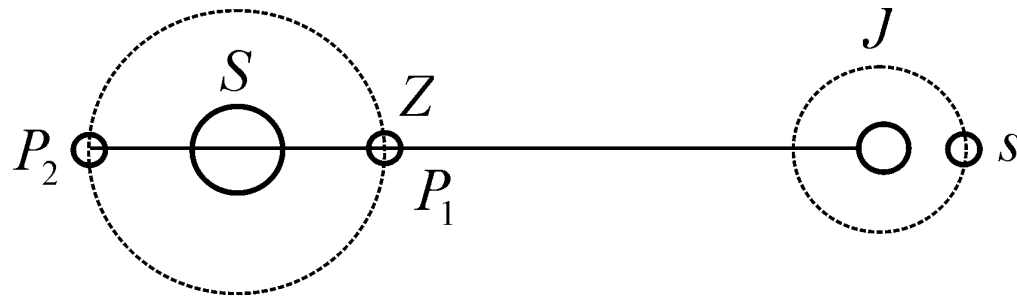
O. Roemer - 1675. astronomskom metodom ustanovio da se svjetlost širi konačnom brzinom.

Nema podataka da je Roemer i izračunao brzinu svjetlosti, ali je mogao dobiti vrijednost blizu *$2,1 \times 10^8$ m/s*

$2,1 \times 10^8$ m/s? → rezultat se dobije iz različitih vremena pomračenja Jupiterovog satelita.

Optika 3

$2,1 \times 10^8 \text{ m/s}$? → rezultat se dobije iz različitih vremena pomračenja Jupiterovog satelita.



Položaji Jupitera (J), njegovog satelita (s), Zemlje (Z) i Sunca (S) u astronomskoj metodi određivanja brzine svjetlosti.

Sa Zemlje se promatra pomrčina Jupiterovog satelita. → Pomrčina dulje traje kad je Zemlja u položaju P_2 nego u položaju P_1 →

Mjerenje trajanja pomračenja → Zaključak: Svjetlost putuje 22 minute po promjeru putanje Zemlje.

Poznavajući promjer putanje Zemlje → brzina svjetlosti

-važnost eksperimenta: svjetlost ima konačnu brzinu i dan je njen iznos

Optika 4

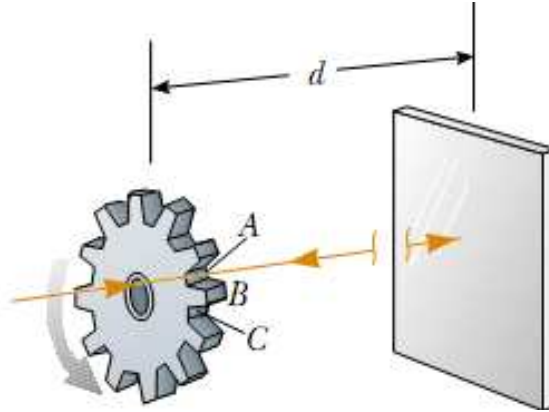
G. Galilei - Nekoliko godina ranije predložio metodu mjerenja brzine svjetlosti pomoću dvije (pokrivene) svjetiljke na dva brežuljka udaljena 1,5 km.

Pokus: Prvi eksperimentator otkrije svjetiljku, a drugi sudionik u eksperimentu na drugom brežuljku otkriva svoju svjetiljku kad zapazi svjetlost prve svjetiljke.

Prvi eksperimentator mjeri vrijeme od otkrivanja svoje svjetiljke do pojave svjetlosti druge svjetiljke. → Pokus je načelno korektan, ali je mjereni interval vremena vrlo mali i nije mogao tada biti izmjeren.

Optika 5

Fizeau 1849. godine - Prvo mjerenje brzine svjetlosti na Zemlji.
- uređaj koji je sadržavao izvor svjetlosti, zupčasti kotač i zrcalo



- kod određene kutne brzine kotača snop svjetlosti je putovao kroz zarez kotača, odbio se od zrcala i vratio kroz sljedeći zarez (tu su bile zapravo još i leće za dobivanje paralelnog snopa svjetlosti na putu od oko 8,6 km, u jednom smjeru puta). → brzina svjetlosti od približno $3,15 \times 10^8$ m/s.

Danas se uzima za brzinu svjetlosti u vakuumu:

$$c = (2,997925 \pm 0,000003) \times 10^8 \text{ m/s}$$

J. Maxwell i H. Hertz (19. st.) → Pokazali da je svjetlost elektromagnetski val u kojem sinusni titraji električnog polja uzrokuju sinusne titraje magnetskog polja okomitog na el. polje.

Optika 6

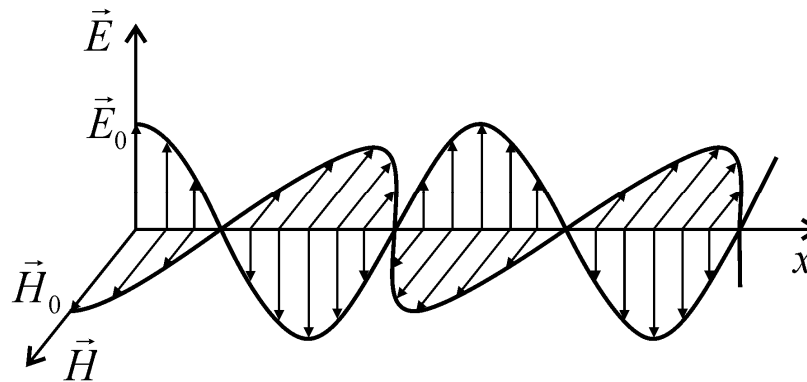
Elektromagnetska perturbacija (poremećaj) se širi faznom brzinom \mathbf{v} , tako da val električnog polja opisuje sljedeći izraz:

$$\vec{E} = \vec{E}_o \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \vec{E}_o \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

E_o = amplituda jakosti električnog polja

Slična jednačba vrijedi i za sinusno magnetsko polje.

Grafički:



Slika \rightarrow Vektori \mathbf{E} i \mathbf{H} ostaju u istoj ravnini titranja. \rightarrow Kažemo da gornja jednačba opisuje *linearno polarizirani val*.

Vidljiva svjetlost = elektromagnetski val s duljinama vala (λ) od oko **400 do 750 nm**.

Optika 7

Valna teorija svjetlosti → daje za brzinu svjetlosti u vakuumu ($\mathbf{v} = \mathbf{c}$) izraz, odnosno vrijednost:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs} / \text{Am}) (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As} / \text{Vm})}}$$

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} / \text{s}$$

Korpuskularna teorija svjetlosti

I. Newton → Svjetlost se shvaća uglavnom kao mnoštvo čestica.

I. Newton (u svojoj korpuskularnoj teoriji): *"Zrake svjetlosti su kao vrlo mala tjelešca (korpuskule) koja svijetle, a emitirana su iz tvari ..."*

17. i 18. stoljeće → Korpuskularna i Huygensova valna teorija koegzistiraju zajedno. (Zbog Newtonova ugleda → malo više pristalica)
početak 19. st. → *Young* otkriva pojavu interferencije. → Valna teorija nadvladava korpuskularnu teoriju svjetlosti.

fotoelektrični efekt (otkriven 1887. godine) – "Svjetlost koja pada na metal izbacuje elektrone iz metala." → Ne može se protumačiti valnom teorijom. S druge strane, tu pojavu dobro opisuje korpuskularna teorija svjetlosti.

A. Einstein (1905. godine) - Objavio rad u kojem je dao tumačenje fotoelektričnog efekta. → Nobelova nagrada za fiziku.

A. Einstein (1905. godine) - Pretpostavlja da je svjetlost sastavljena od zrnaca ili kvanata svjetlosti, odnosno fotona.

Korpuskularna teorija svjetlosti 2

A. Einstein (1905. godine) - Pretpostavlja da je svjetlost sastavljena od zrnaca ili kvanata svjetlosti, odnosno fotona.

A. Einstein → Svaki foton ima energiju $E = h\nu$. (Gdje je Planckova konstanta $h = 6,624 \times 10^{-34} \text{ Js}$, dok je ν frekvencija svjetlosti.)

Fotoni su čestice koje se gibaju brzinom svjetlosti. → Pripada im energija, $E = h\nu$, i količina gibanja: $p = E/c = h/\lambda$.

Fotoni su zrnca energije, a svjetlost je širenje energije u prostoru.

Korpuskularna teorija je zadržala veličinu ν (frekvenciju), ponekad i λ .

Današnje stanovište: *Svjetlost ima dvojaki karakter: svjetlost, zavisno o pokusu koji izvodimo, ima svojstva vala (gibanje) ili čestice (interakcija s materijom).*

Statistička interpretacija (ublažava dvojnost) → Kvadratu amplitude vala svjetlosti pridaje značenje vjerojatnosti nalaženja fotona u nekoj točki prostora.

Odgovor na pitanje, što je svjetlost, ostaje i nadalje neodređen i otvoren.

Geometrijska optika

Geometrijska optika → Zanemaruje valni karakter svjetlosti (ne pita se uopće za narav svjetlosti).

Geometrijska optika:

- a) Zakonitosti koje se odnose na optičke sustave i na pojave širenja svjetlosti kroz prozirna (dioptrijska) sredstva.
- b) Odbijanje i lom svjetlosti na graničnoj plohi dvaju sredstava.
- c) Nastanak slike za neki izvor svjetlosti.

Iskustvo: *Svjetlost se širi u pravcima.*

Iskustvo: Izvor svjetlosti ne vidimo iza ugla.

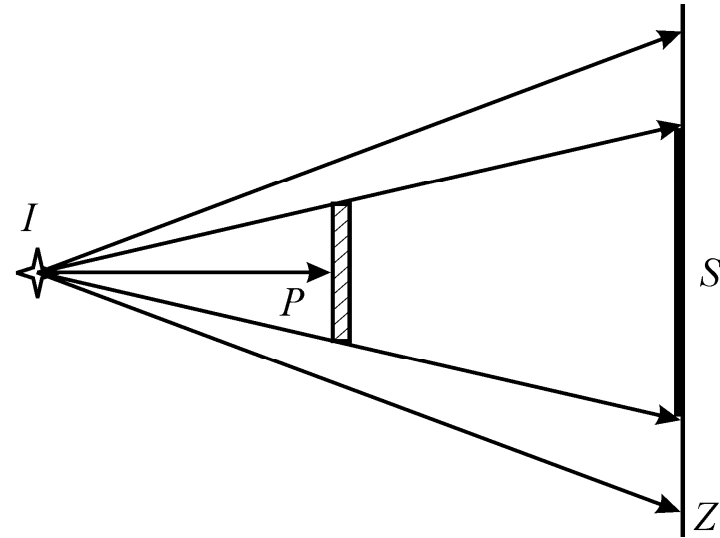
Iskustvo: Osvijetljeni predmeti daju sjenu.

Točkasti izvor svjetlosti = def = Izvor kojemu je veličina zanemariva s obzirom na promatranu udaljenost.

Geometrijska optika 2

Promatramo točkasti izvor svjetlosti koji obasjava zastor:

→ Neprozirni predmet daje sjenu.



Zaključak: Točkasti izvor svjetlosti daje divergentan snop zraka; *u homogenom prozirnom sredstvu svjetlost se širi radijalno, pravocrtno, odnosno zrakasto.*

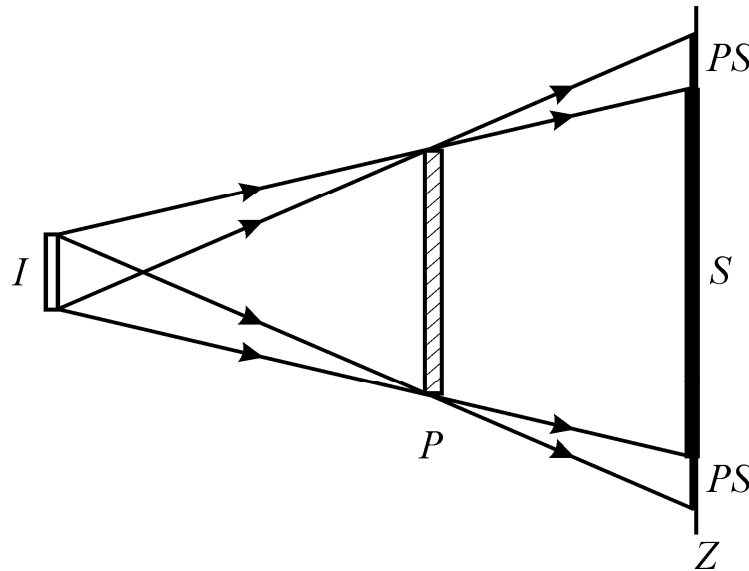
Opaska: Rub sjene i svjetla nije oštar (iako je izvor dovoljno malen).

Dio svjetlosti prodire i iza ruba u područje sjene, pa se čak mogu zapaziti kod ruba u području svjetlosti svjetlije i tamnije pruge odnosno figure, tzv. pojava *ogiba ili difrakcije* (tumači se valnom teorijom svjetlosti.)

Geometrijska optika ne razmatra, tj. zanemaruje pojave ogiba svjetlosti.

Geometrijska optika 3

Kad izvor svjetlosti nije točkast. →

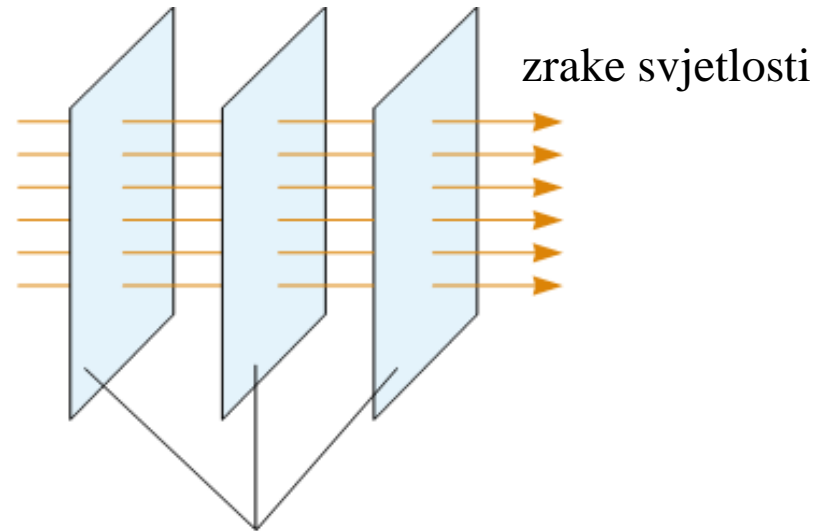


Zaključak: Osim sjene neprozirnog predmeta zapažamo i polusjenu.

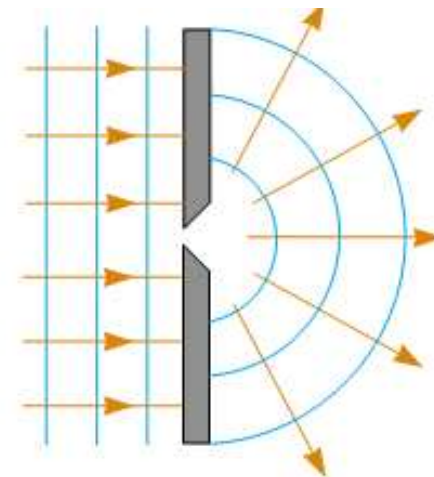
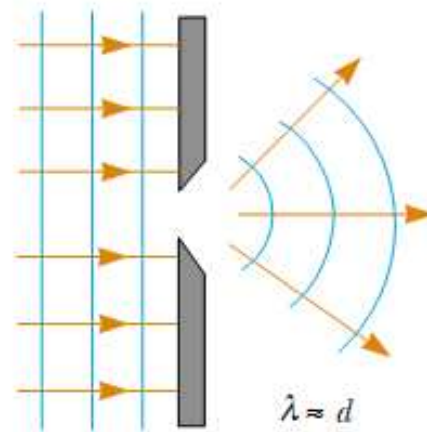
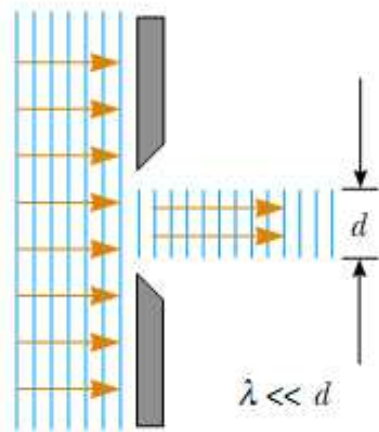
Geometrijska optika 4

Pretpostavke:

1. zrake svjetlosti šire se pravocrtno i okomite su na valne fronte



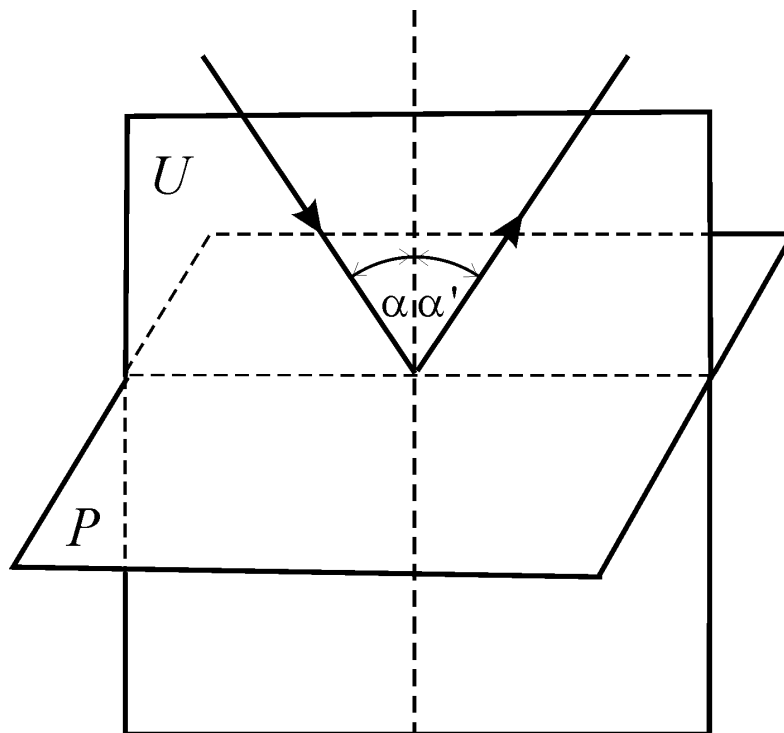
2. $\lambda \ll d$



-odnos valne duljine svjetlosti i veličine otvora na prepreci; za $\lambda \ll d$, svjetlost se širi pravocrtno (nema ogiba)

Zakon odbijanja svjetlosti

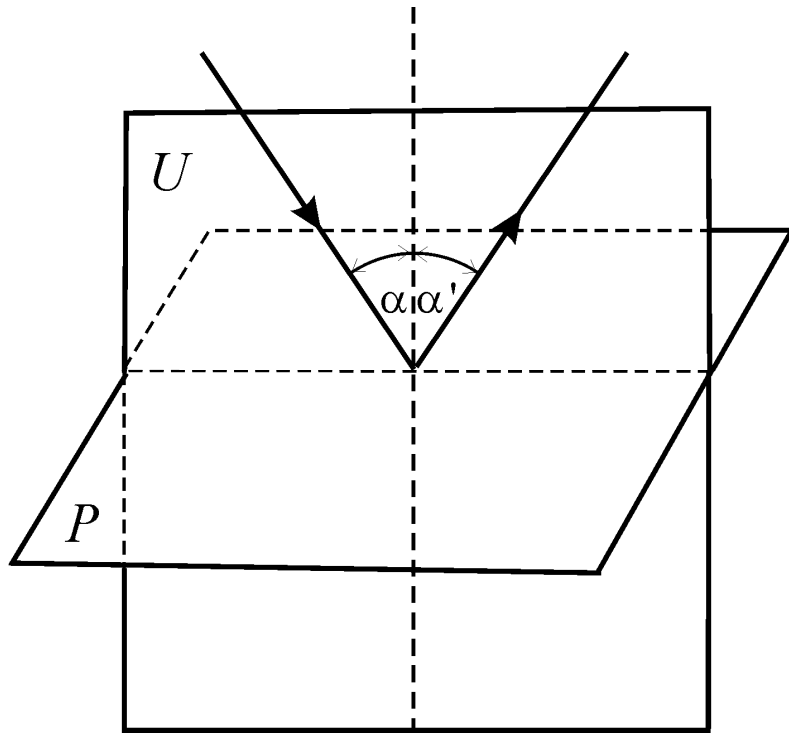
Promatramo snop paralelnih zraka svjetlosti koji pada na ravnu ugrađenu plohu nekog materijala, npr. poliranog metala.



Zaključak: Snop svjetlosti se odbija od plohe i ostaje u ravnini okomitoj na materijalnu plohu.

Zaključak: Upadna i odbijena (ili reflektirana) zraka leže u upadnoj ravnini, koja je određena upadnom zrakom i normalom na plohu.

Zakon odbijanja svjetlosti 2



Zakon odbijanja:

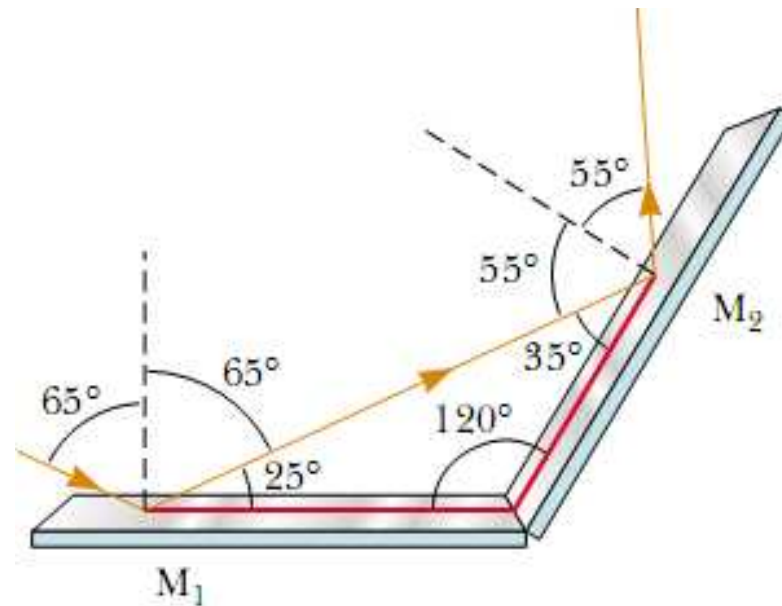
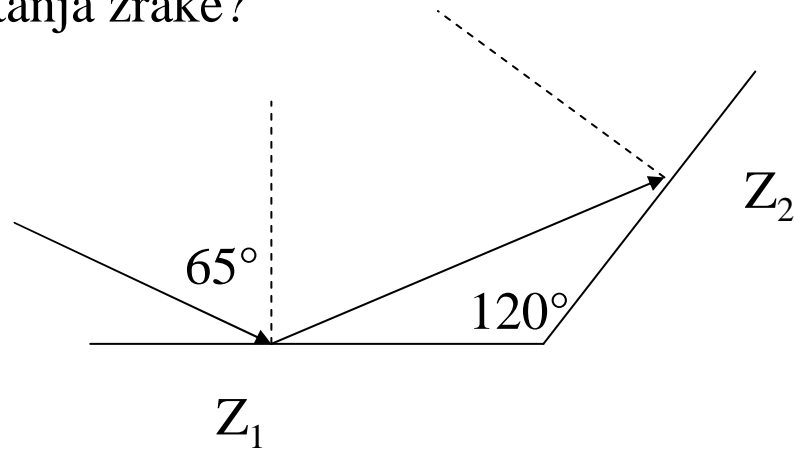
Upadni kut zrake α (kut između upadne zrake i normale na plohu) jednak je odbojnom kutu α' , (tj. $\alpha = \alpha'$)

Pokus – Laserski snop svjetlosti usmjerujemo uz kutomjer na ugladenu metalnu plohu i zamjećujemo kako je upadni kut jednak odbojnom kutu snopa svjetlosti.



Primjer:

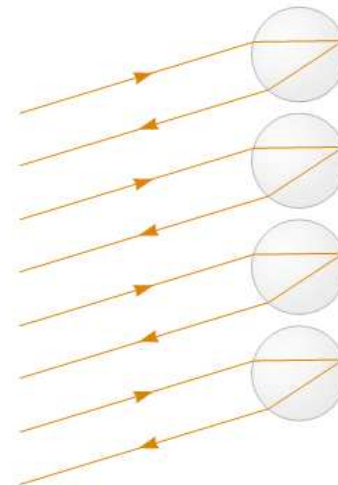
Dva ravna zrcala međusobno su spojena pod kutom od 120° . Ako zraka svjetlosti upada na prvo zrcalo pod kutom od 65° , koliki je reflektirani kut od drugog zrcala, a koliki je ukupni kut zakretanja zrake?



Retrorefleksija

Ako je $\theta=90^\circ$, reflektirana zraka vraća se nazad paralelna upadnoj zruci (retrorefleksija). Ova činjenica iskorištena je pri određivanju udaljenosti Mjeseca od Zemlje. Posada Apolla 11 postavila je na površinu Mjeseca panel s puno malih reflektora (3 okomita zrcala – 3D refleksija). Laserski snop sa Zemlje uperen je direktno u panel i mjereno je vrijeme povrata laserske zrake. Pogreška u mjerenju duljine bila je 15 cm. (Zamislite koliko bi teško bilo postaviti samo jedno ravno zrcalo usmjereno bašu određenu točku na Zemlji).

- primjena u prometu (“mačje oči” na vozilima,



Zakon loma svjetlosti

Promatramo snop paralelnih zraka svjetlosti koji prolazi kroz ravnu graničnu plohu dvaju *homogenih izotropnih dioptrijskih* sredstava.

Pokus: → Dolazi do promjene smjera širenja svjetlosti; to je pojava loma ili refrakcije svjetlosti.

dioptrijska ploha = ploha koja dijeli dva dioptrijska sredstva

Pokus: → Lomljena zraka leži u upadnoj ravnini, a omjer je sinusa upadnog i lomljenog kuta stalan.

Pokus – Štapić (ili olovka) uronjen djelomično u čašu s vodom, čini se, gledajući sa strane, prelomljen na površini vode!

Objašnjenje? Pomoću Huygensovog principa.

Huygensov princip

Elementarni val (def): valno gibanje što se širi iz jednog točkastog izvora u obliku kugle (odnosno kružnice, ako se val giba u ravnini).

Valna fronta (čelo vala) – nastaje interferencijom skupa elementarnih valova

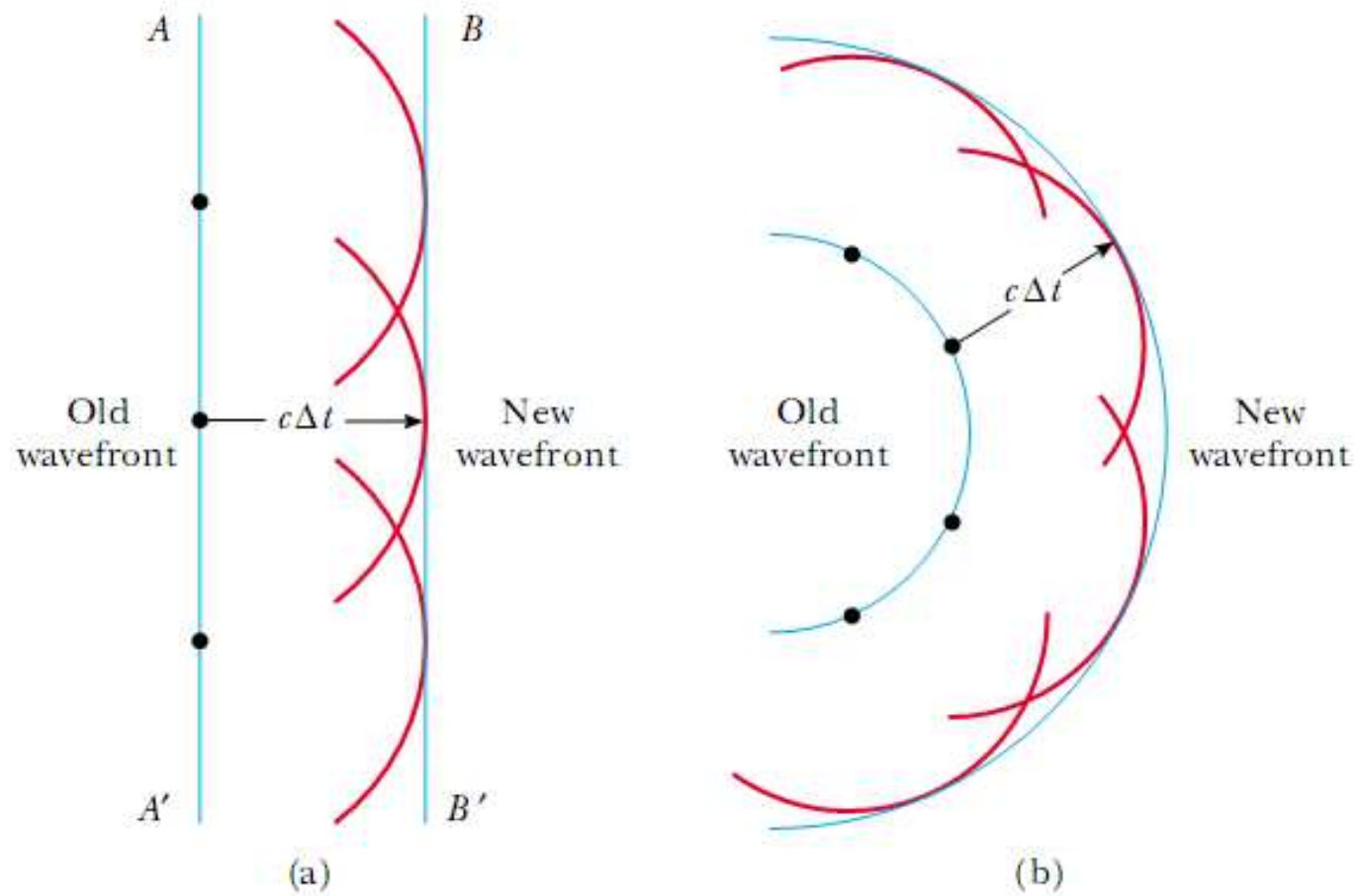
Huygensov princip – opisuje kako se iz elementarnih valova dobija čelo vala.

-geometrijska konstrukcija kojom se iz prethodne valne fronte određuje položaj nove valne fronte → svaka točka valne fronte izvor je novog (elementarnog) vala; nova valna fronta dobije se kao tangenta krivulja na nove elementarne valove

Pokus:

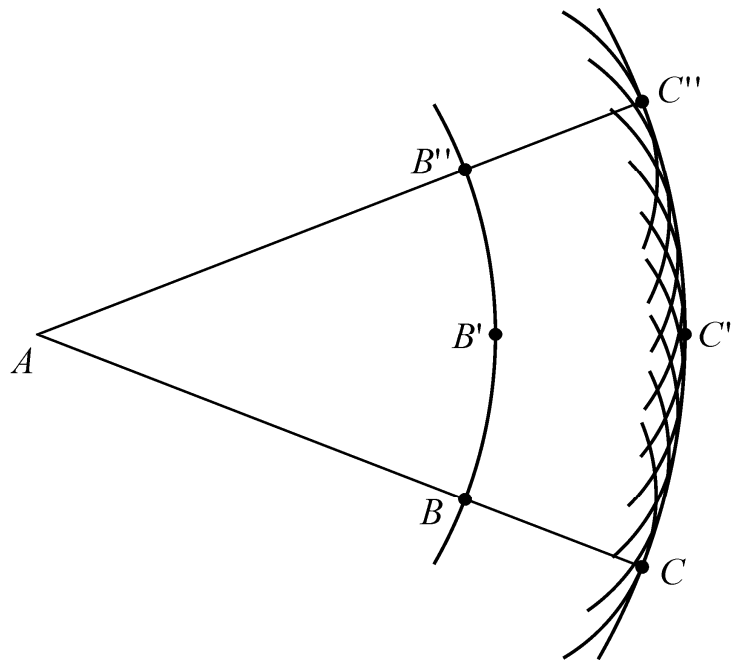
Valovi na vodi i prepreka

Pokusi:



Huyensova konstrukcija za a) ravne i b) sferne valove.

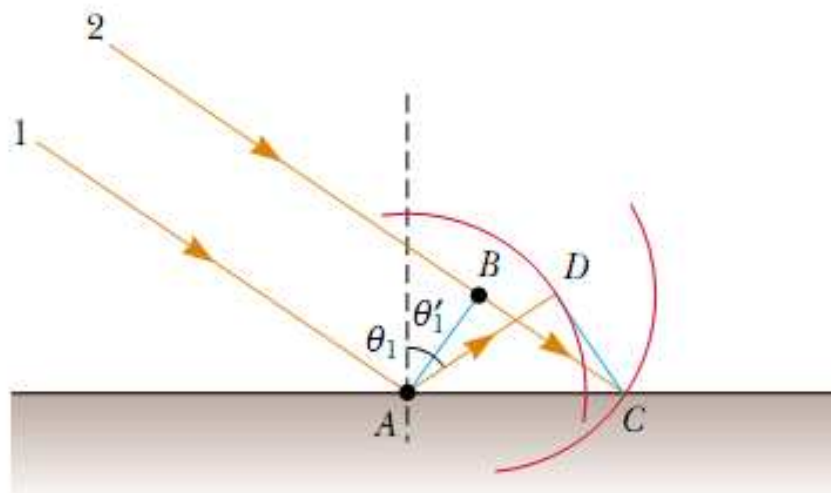
Ch. Huygens (17. st.) - Princip pretpostavlja da svaka točka prostora u koju stigne val svjetlosti (ili val neke druge naravi) postaje izvor novog kuglastog vala kojemu je središte promatrana točka prostora; zbroj valnih ploha na istoj radijalnoj udaljenosti od izvora daje rezultatnu sfernu valnu plohu sa središtem u zajedničkom izvoru (u točki A na slici)



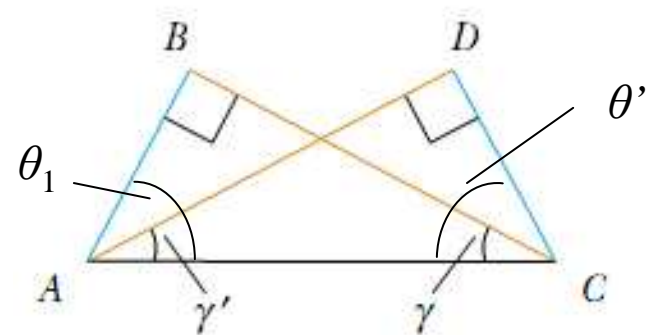
Huygens → Svaka točka vala napreduje tako da ostaje na istom pravcu koji prolazi kroz točkaste izvore svjetlosti (na slici, u točkama A, B, C, itd.) te se svjetlost širi zrakasto

Pokusi:

Objašnjenje zakona odbijanja (refleksije) pomoću Huygensovog principa



a)



b)

-AB je valna fronta upadnog vala svjetlosti u trenutku kada zraka 1 stigne u A; tada se iz A odašilje novi elementarni val (u smjeru D), a iz B novi elementarni val u smjeru C; budući se obje zrake gibaju istom brzinom c , vrijedi $AD=BC=ct$; iz slike b) vrijedi:

$$\cos \gamma = \frac{BC}{AC} \quad \cos \gamma' = \frac{AD}{AC}$$

$$\gamma = 90^\circ - \theta_1 \quad \gamma' = 90^\circ - \theta'_1$$

$$AD = BC$$

$$\cos \gamma = \cos \gamma'$$

$$\gamma = \gamma'$$

$$90^\circ - \theta_1 = 90^\circ - \theta'_1$$

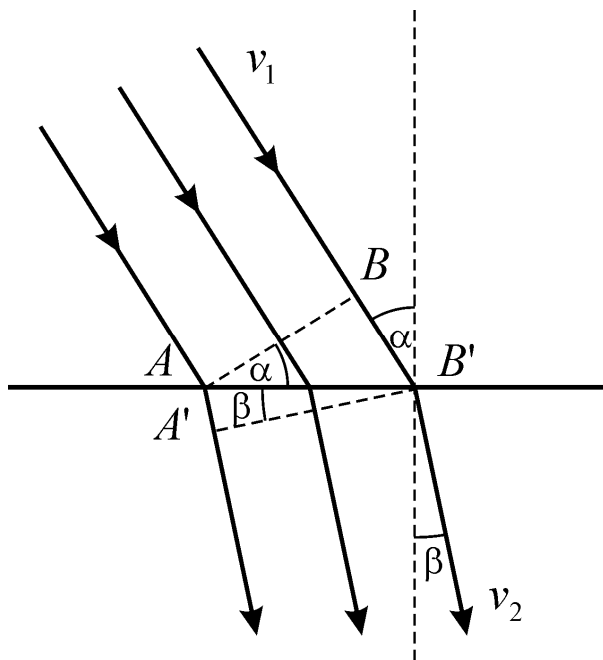
$$\theta_1 = \theta'_1$$

Zakon loma svjetlosti 2

Pokus: → Lomljena zraka leži u upadnoj ravnini, a omjer je sinusa upadnog i lomljenog kuta stalan.

Objašnjenje? Pomoću Huygensovog principa.

Promatramo (na granici dvaju sredstava) upadni snop svjetlosti pod kutom α te, nakon prolaza dioptrijske ravnine, pod kutom β .



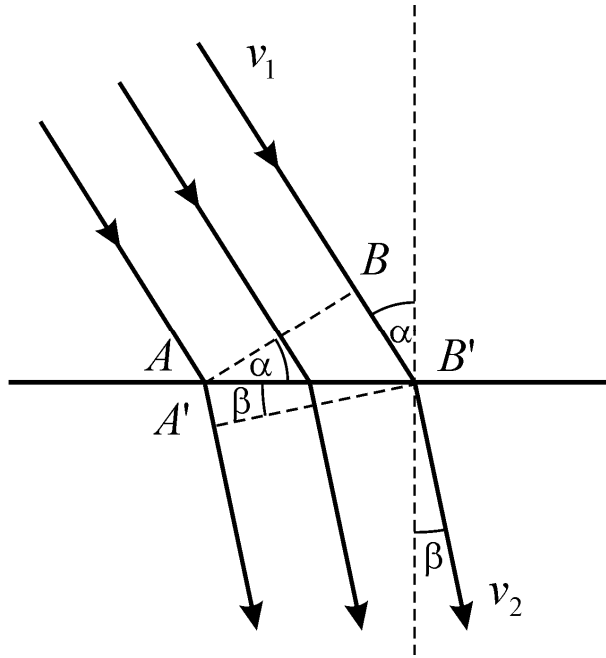
v_1 = brzina svjetlosti u prvom sredstvu

v_2 = brzina svjetlosti u drugom sredstvu

valna ravnina AB (okomita na upadne zrake) nakon prolaza snopa kroz dioptrijsku plohu → zakreće se u položaj $A'B'$.

Da bi valna ravnina ostala okomita na zrake i u drugom sredstvu → zrake (ili pravci širenja vala) prelaze različite putove (AA' , BB') u istom intervalu vremena Δt .

Zakon loma svjetlosti 3



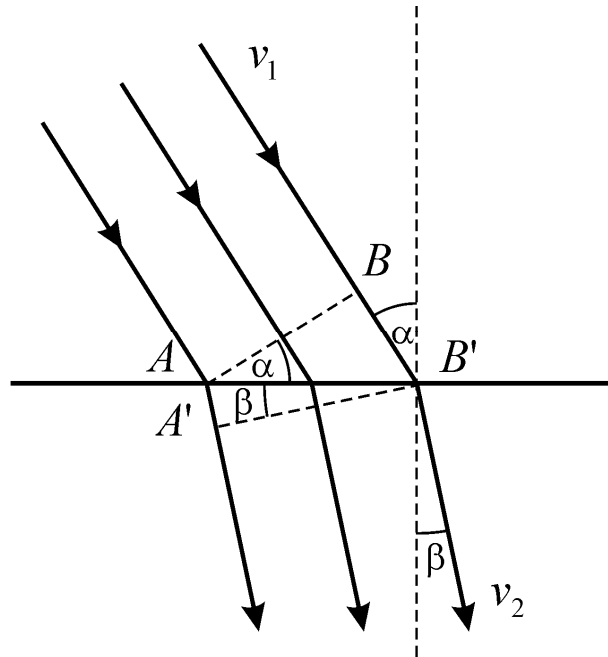
Jer je $d(AA') < d(BB')$ \rightarrow brzina $v_2 < v_1$

Promatramo pravokutne trokute $\triangle AB'B$ i $\triangle A'B'A$. \rightarrow

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \overline{BB'} / \overline{AB'} \\ \sin \beta &= \overline{AA'} / \overline{AB'} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\overline{BB'} / \overline{AB'}}{\overline{AA'} / \overline{AB'}} = \frac{\overline{BB'}}{\overline{AA'}} \quad \rightarrow \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t}$$

$$\rightarrow \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.} \quad \text{zakon loma svjetlosti}$$

Zakon loma svjetlosti 4



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.}$$

Kao parametar dioptrijskog sredstva koristi se također i indeks loma svjetlosti n .

n = omjer brzina svjetlosti u vakuumu i promatranom sredstvu, tj. $n = c/v$

$$\text{Zakon loma postaje: } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}$$



$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad n_{2,1} = \text{relativni indeks loma}$$

Za plinove je indeks loma razmjernan gustoći plina.

Zaključak: U sredstvu većeg indeksa loma ($n_2 > n_1$) zraka svjetlosti se lomi prema normalu ($\alpha > \beta$; s kutom raste i vrijednost funkcije sinus).

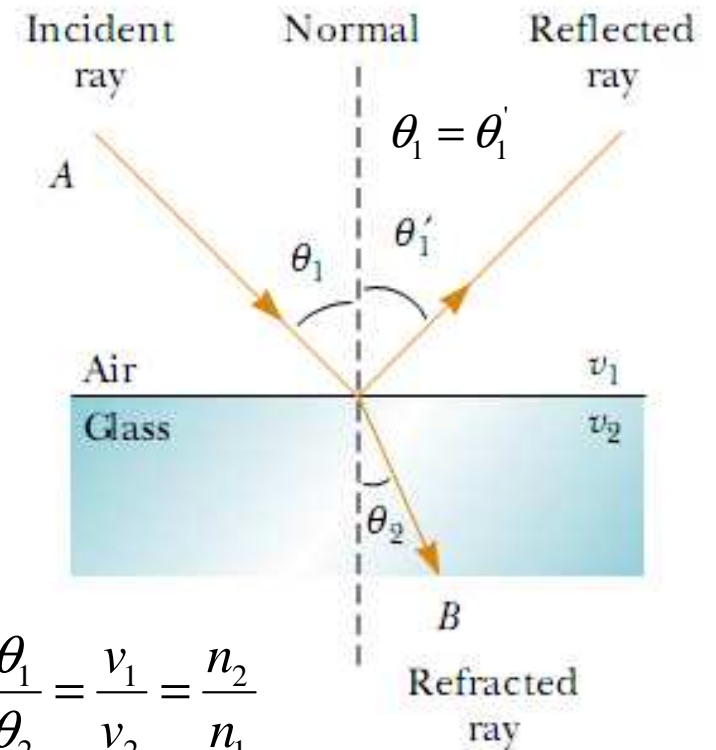
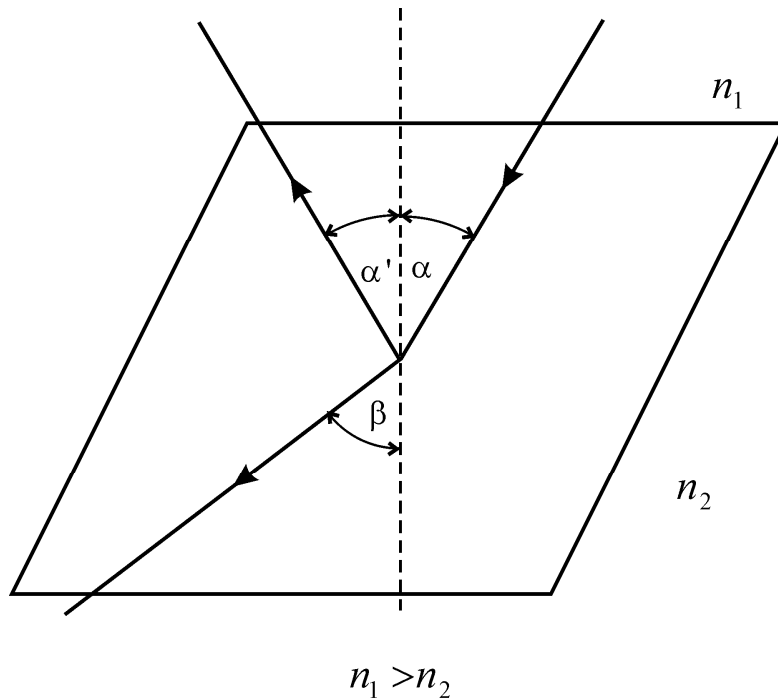
Obratno: Za dioptrijsko sredstvo s većim indeksom loma kažemo da je optički gušće.

Zakon loma svjetlosti 5

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Primjer:

Djelomično odbijanje i lom zrake svjetlosti od normale ($\alpha = \alpha'$); $n_1 > n_2 \rightarrow \alpha < \beta$).



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Zakon loma svjetlosti 6

$$n = c/v \quad \longrightarrow$$

n je uvijek veći od 1 (Jer je c najveća moguća brzina u prirodi.)

Indeks loma za vakuum je jedan ($n_o = 1$).

Za zrak je indeks loma $n_z = 1,000293 \rightarrow$ obično se uzima $n_z \approx 1$.

Sredstvo	n
zrak	1,000293
voda	1,333
etilni alkohol	1,361
glicerin	1,455
benzol	1,501
kvarc	1,544
staklo	1,46 – 1,96
dijamant	2,417

Vrijednosti indeksa loma za različita sredstva, ali za valnu duljinu svjetlosti $\lambda = 589 \text{ nm}$ (koju daje žuti natrijev plamen, odnosno natrij unesen u bezbojni plamen zemnog plina, kod normalnih okolnosti):

Zakon loma svjetlosti 7

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Poseban slučaj: Svjetlost upada okomito na dioptrijsku ravninu.

$$\alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = 0 \quad \longrightarrow \quad \sin \beta = 0 \quad \longrightarrow \quad \beta = 0 \quad \longrightarrow$$

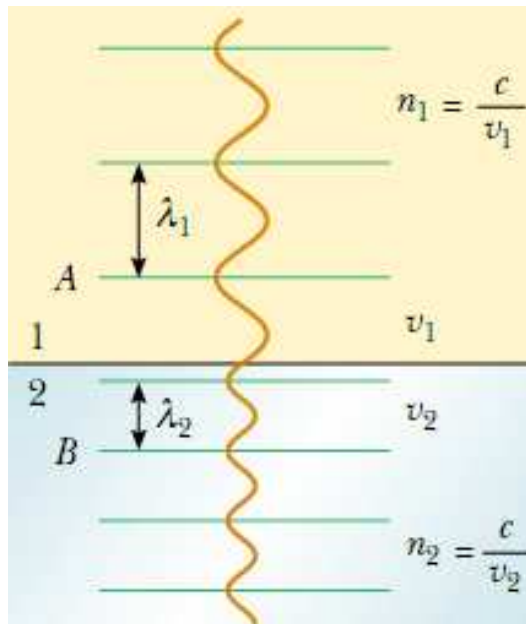
Za okomitu upadnu zraku nema loma, ili nema odklona zrake od upadnog smjera.

Pri prijelazu svjetlosti iz jednog sredstva u drugo, mijenja se brzina svjetlosti, a onda i valna duljina svjetlosti, dok frekvencija ostaje ista ($\nu = v/\lambda$).

Ponekad se opisani zakon loma svjetlosti naziva i **Snellovim zakonom loma** (W. Snell, 16/17. st.).

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Zašto se svjetlost lomi?



Pri prijelazu svjetlosti iz jednog sredstva u drugo, mijenja se brzina svjetlosti, a onda i valna duljina svjetlosti, dok frekvencija ostaje ista ($\nu = v/\lambda$).

Zašto je to tako?

Neka val valne duljine λ_1 i brzine v_1 prolazi kraj promatrača A i upada na granicu sredstva 1 i 2. Frekvencija vala mora biti ista za promatrača A (1) i B (2), inače bi se energija nakupljala na granici sredstva. Budući su brzine različite u različitim sredstvima (1 i 2), vrijedi:

$$f_1 = f_2 = f$$

$$v_1 = f\lambda_1$$

$$v_2 = f\lambda_2$$

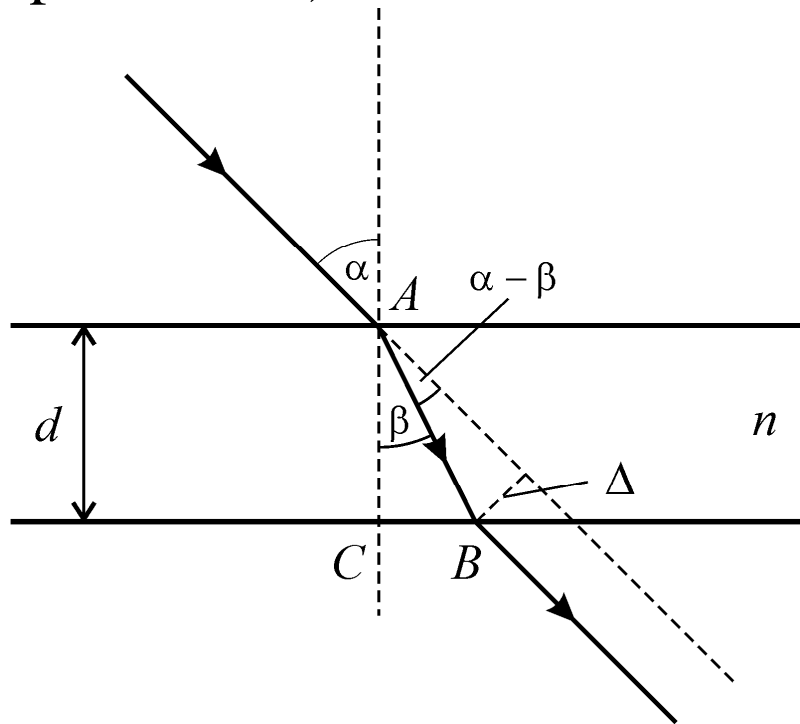
$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n} \quad (\text{za } n_1=1, \lambda_1=\lambda_{\text{vakuum}}=\lambda, \lambda_2=\lambda_n, n_2=n)$$

Prolaz svjetlosti kroz planparalelnu ploču

Promatramo svjetlost koja pada na planparalelnu ploču, indeksa loma n , debljine d , pod kutom α . (Ploča se nalazi u zraku (s indeksom loma približno 1)).



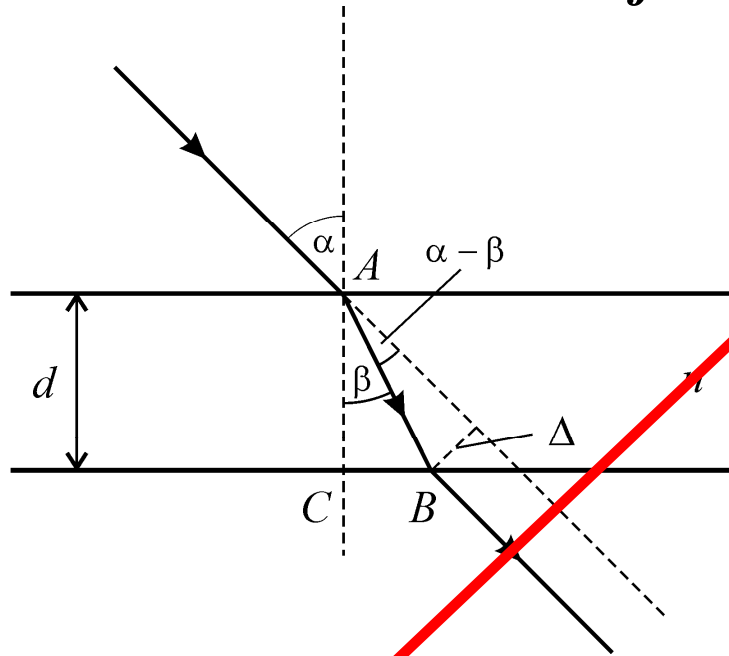
Snop svjetlosti se dva puta lomi (i djelomično odbija) i izlazi iz ploče usporedo s upadnim smjerom.

Koristimo odnos geometrijskih veličina koje su prikazane na slici; koristimo zakon loma i trigonometrijske relacije → eksplicitni izraz za Δ (udaljenost između pravaca upadne i izlazne zrake iz ploče):

$$\sin(\alpha - \beta) = \Delta / \overline{AB} \qquad \overline{AB} = d / \cos \beta \qquad \longrightarrow$$

$$\Delta = \overline{AB} \sin(\alpha - \beta) = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$$

Prolaz svjetlosti kroz planparalelnu ploču 2



$$\Delta = \overline{AB} \sin(\alpha - \beta) = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}$$

zakon loma \rightarrow $\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}$$

$$\Delta = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \longrightarrow \Delta = d \frac{\sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha}{\cos \beta} \longrightarrow$$

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

Mjerimo d , α i $\Delta \rightarrow$ indeks loma prizme n

Totalna refleksija

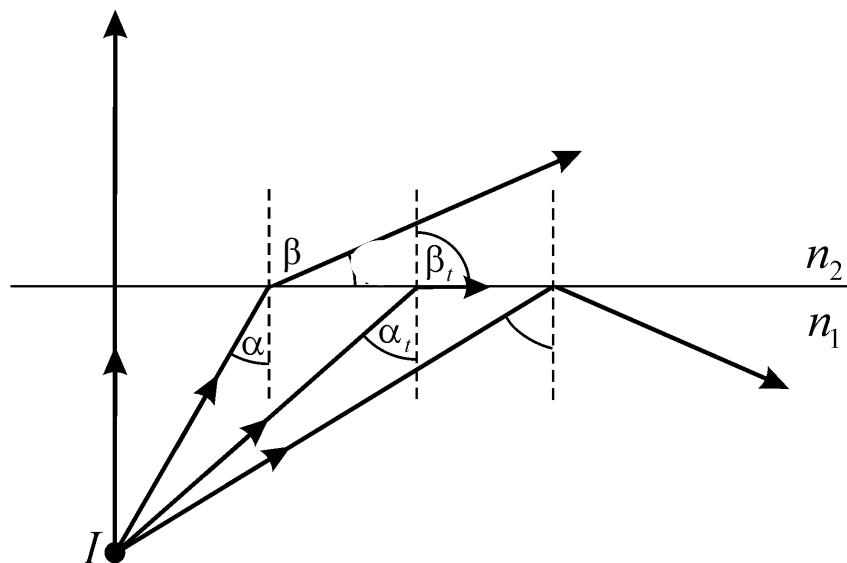
Promatramo slučaj kada svjetlost upada na dioptrijsku plohu iz optički *gušćeg u rjeđe sredstvo* ($n_1 > n_2$): \rightarrow

Zakon loma \rightarrow U drugom sredstvu svjetlost se otklanja od normale.

Povećanje upadnog kuta (α) \rightarrow povećanje i kuta loma (β)

U jednom trenutku \rightarrow lomljena zraka postane tangencijalna na granicu sredstava, tj. $\beta_t = \pi/2$

Zaključak: Za neki upadni kut α_t (*ovisi o relativnom indeksu loma*) lomljena zraka postane tangencijalna na granicu sredstava ($\beta_t = \pi/2$).

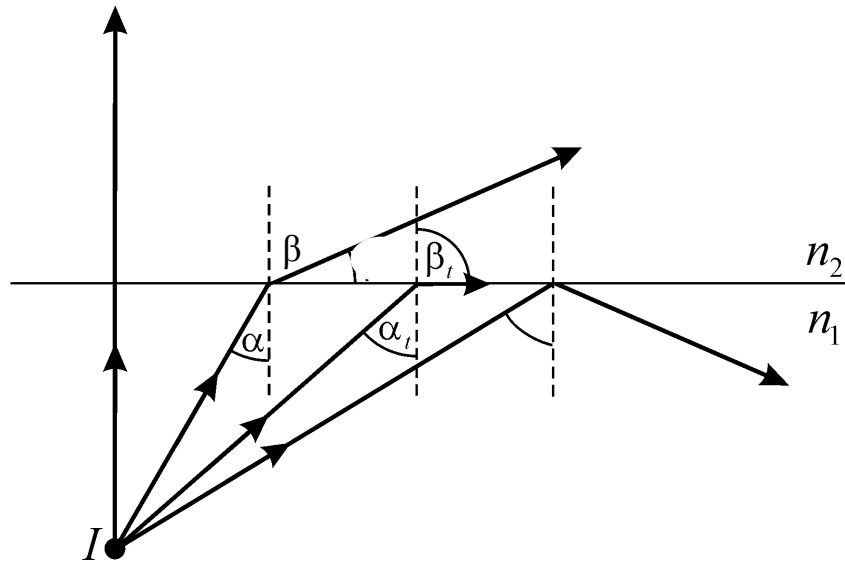


Zakon loma postaje:

$$\frac{\sin \alpha_t}{\sin \beta_t} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin \alpha_t}{\sin \pi / 2} = n_{2,1} \quad \rightarrow$$

$$\sin \alpha_t = n_{2,1}$$

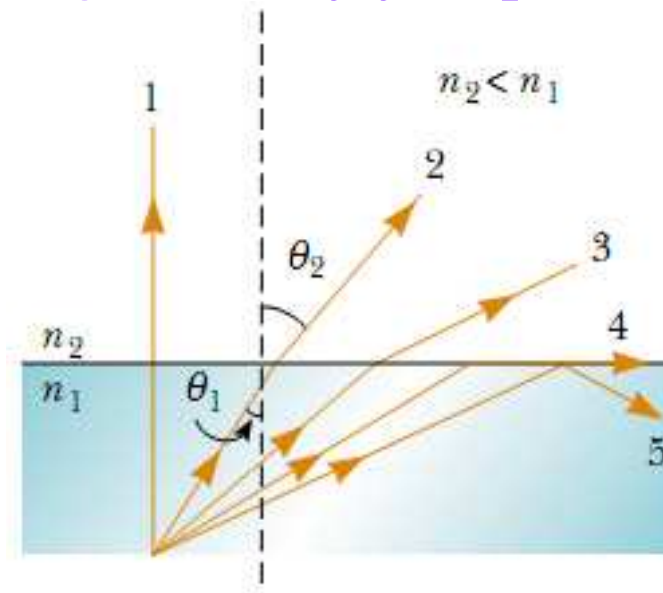
Totalna refleksija 2



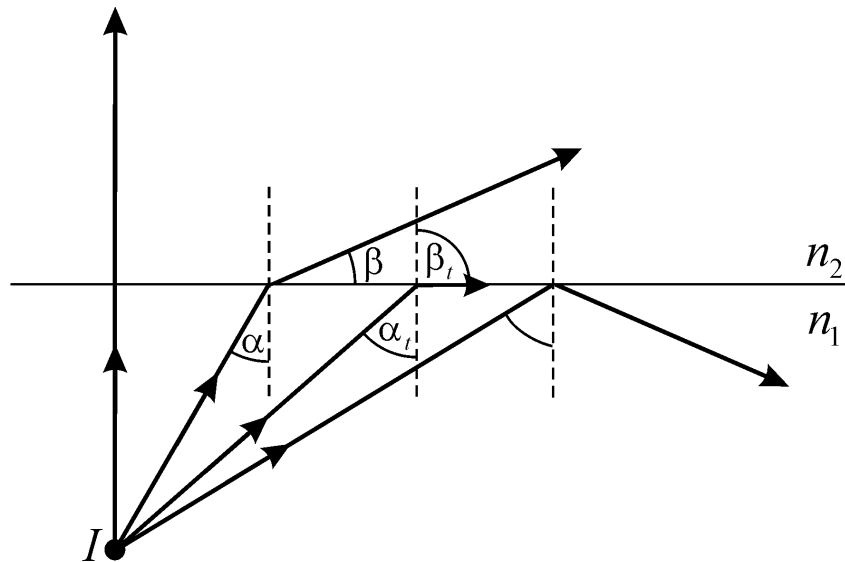
$$\sin \alpha_t = n_{2,1}$$

Što se događa kada je upadni kut α veći od α_t ?

Zrake ne prelazi u drugo sredstvo, nego se odbijaju u prvo sredstvo
(α_t = kut totalne refleksije).



Totalna refleksija 3



$$\sin \alpha_t = n_{2,1}$$

Primjer: Odredi kut totalne refleksije za sredstva voda/zrak, tj. za prijelaz svjetlosti iz vode ($n_1 = 1,33$) u zrak ($n_2 = 1$).

$$n_1 = 1,33$$

$$n_2 = 1$$

$$\sin \alpha_t = n_{2,1} \quad \Rightarrow \quad \alpha_t = \arcsin \frac{n_2}{n_1} = \arcsin \frac{1}{1,33} = \arcsin 0,75$$

$$\alpha_t = 48,5^\circ$$

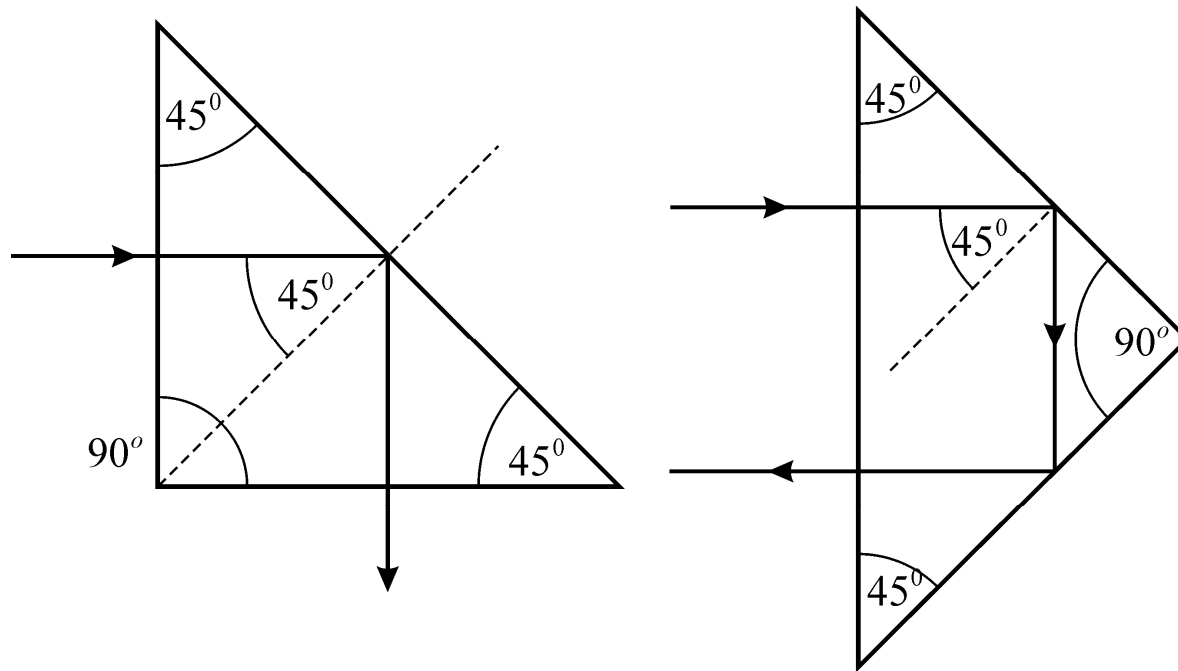
Zaključak: Samo onaj dio svjetlosti iz podvodnog svjetlosnog izvora, dio koji je sadržan u stošcu polukuta od $48,5^\circ$, prelazi u zrak, dok je ostatak svjetlosti totalno reflektiran u vodi. (Pokus: java)

Totalna refleksija 4

Primjena: Perroova prizma (prizma s kutovima 45/45/90 °).

Kut totalne refleksije za sredstva staklo ($n_1 = 1,5$) i zrak je 42° . →

Staklena prizma → Za promjenu smjera zrake svjetlosti pomoću totalne refleksije.



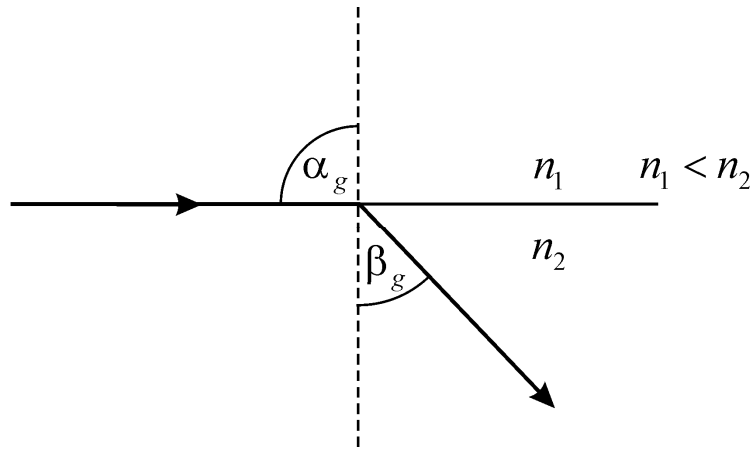
Slučaj kada je upadni kut zrake svjetlosti (45°) na graničnoj ravnini staklo/zrak veći od kuta totalne refleksije (42°).

Totalna refleksija 5

Promatramo prijelaz zrake svjetlosti iz optički *rjeđeg u gušće* sredstvo ($n_1 < n_2$):

Zakon loma \rightarrow zraka se lomi prema normalni.

Kada će kut loma biti najveći? Onda kada je upadni kut najveći!



\rightarrow Kada je upadna zraka tangencijalna na granici sredstava. \rightarrow Lomljena zraka zatvara neki kut β_g prema normalni. (β_g = granični kut loma).

Zakon loma:

$$\frac{\sin \alpha_g}{\sin \beta_g} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin \pi / 2}{\sin \beta_g} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \beta_g = \frac{n_1}{n_2}$$

Zaključak: Isti par sredstava ($n_1 \leftrightarrow n_2$). \rightarrow Granični kut po iznosu odgovara kutu totalne refleksije, tj. $\beta_g = \alpha_t$.

Totalna refleksija 6

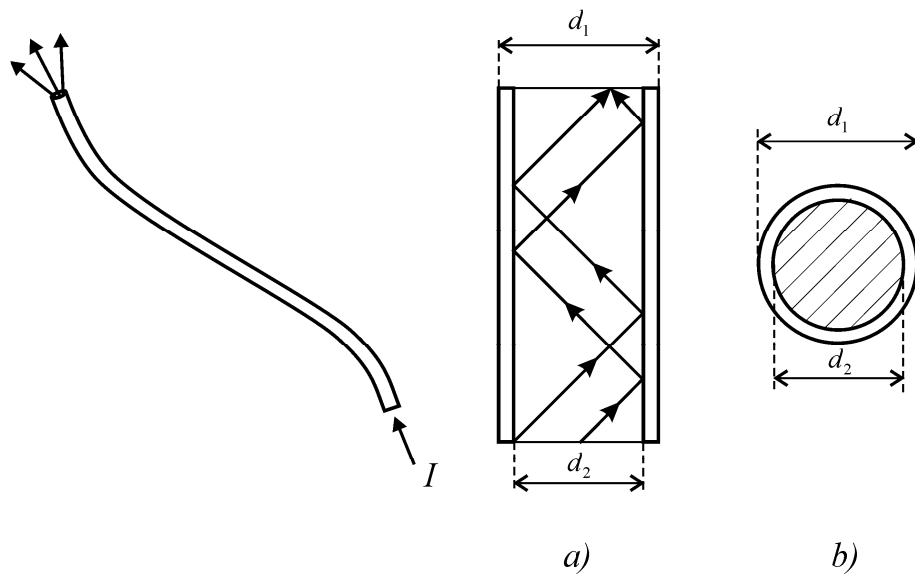
Tablica: Kut totalne refleksije za prijelaz svjetlosti iz dane tvari u zrak.

Tvar/zrak	α_t (°)
dijamant	24,44
kvarcno staklo	43,27
etilni alkohol	47,25
glicerin	43,42
ugljik-dioksid	37,91
voda	48,50

Primjena totalne refleksije - vodiči svjetlosti ili svjetlovodi

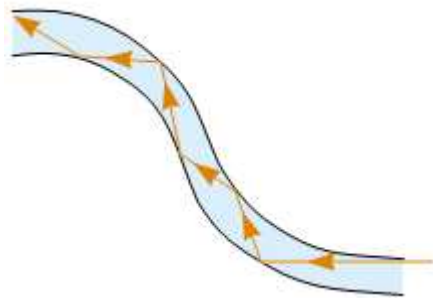
Svjetlovodi –

Staklena ili plastična vlakna promjera od nekoliko do $100\ \mu\text{m}$, s indeksom loma središnje jezgre, primjerice, 1,63 i omotača 1,52.



Da bi zraka svjetlosti bila vođena svjetlovodom, maksimalni kut zrake prema osi vlakna je 32° .

Primjer: Vlakna promjera $70\ \mu\text{m}$, možemo svijati na najmanji dopustivi polumjer zakrivljenosti od 12 mm (seminarski rad - obrazložiti dobivenu vrijednost polumjera zakrivljenosti za svjetlovod).



Primjena totalne refleksije - vodiči svjetlosti ili svjetlovodi 2

Primjene: Tanka staklena vlakna s omotačem, ili optička vlakna, koriste se obično u svežnjevima (npr. od nekoliko desetaka ili stotina vodiča svjetlosti).

Medicinska dijagnostika - svjetlovodi kao endoskopi za promatranje unutrašnjosti organa; primjerice, kod gastroskopije se endoskop unosi kroz usta pacijenta u želudac, što onda omogućuje vizualno promatranje stjenke želuca (slično kod promatranja pluća i dr.)

Informatika, televizijska tehnika i telefonija - Prijenos binarnih signala uz korištenje moduliranog laserskog snopa svjetlosti.

Optički kablovi (premda električni izolatori) - uspješno zamjenjuju metalne vodiče (masa bakarnog vodiča dužine 1 km je oko 30 kg, dok odgovarajući optički kabel ima masu od 0,012 kg/km).

Primjena totalne refleksije - vodiči svjetlosti ili svjetlovodi 3

Primjer: Pod kojim kutom ronilac vidi zalazak sunca? Indeks loma vode je $4/3$ (za zrak uzimamo indeks loma približno 1).

$$n_1 = 1$$

$$n_2 = 4/3$$

$$\alpha_g = ?$$

$$\beta_g = \arcsin \frac{n_1}{n_2} = \arcsin \frac{1}{\frac{4}{3}} = \arcsin \frac{3}{4}$$

$$\beta_g = 48,6^\circ$$

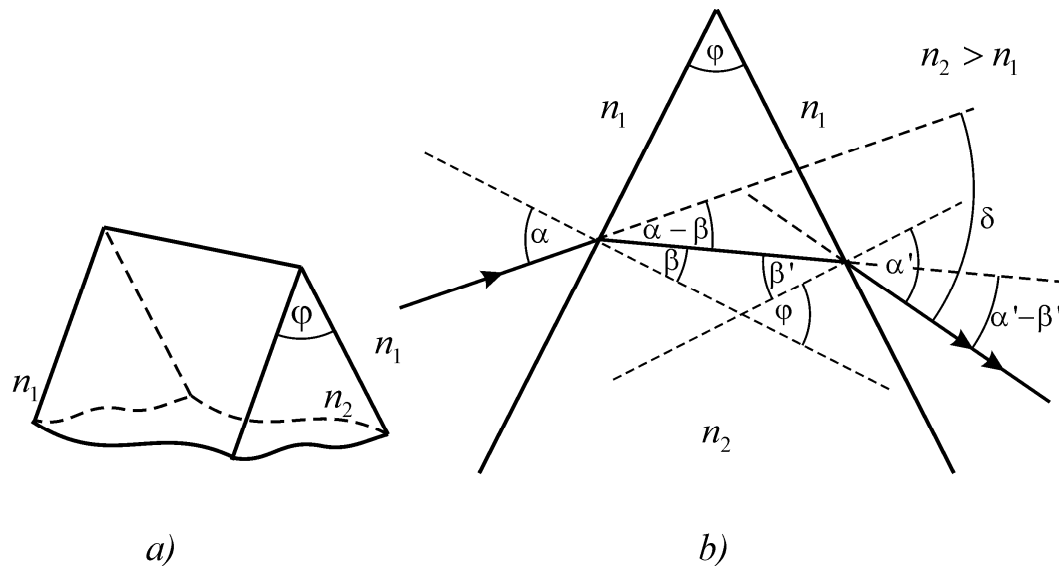
Optička prizma

Prizma - Optičko sredstvo ograničeno s dvije dioptrijske ravne plohe koje nisu međusobno paralelne.

Brid prizme - Pravac u kojem se sijeku dioptrijske ravnine.

Kut prizme φ - Kut između bridova prizme.

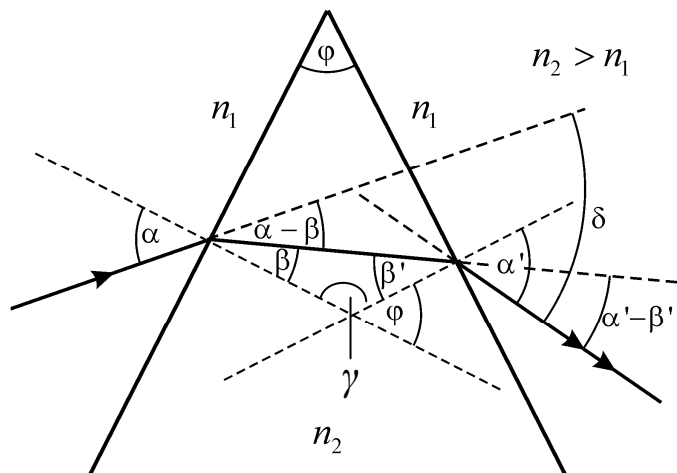
Ravnina normalna na brid prizme siječe prizmu u njenom glavnom presjeku (*b*):



Promatramo prolazak zrake monokromatske svjetlosti kroz prizmu, koja ima indeks loma n_2 , a nalazi se u sredstvu indeksa loma n_1 .

Zraka se dva puta lomi (na ulazu i izlazu iz prizme) te se otklanja za kut devijacije δ (kut između upadne i izlazne zrake).

Optička prizma 2



Uvodimo oznake:

α - upadni kut (prvi)

β - prvi kut loma

β' - drugi upadni kut

α' - drugi kut loma

δ - kut otklona (devijacije)

$$\varphi = \beta + \beta' \quad (\beta + \beta' = 180^\circ - \gamma, \gamma + \varphi = 180^\circ)$$

$$\delta = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta') = (\alpha + \alpha') - (\beta + \beta') \longrightarrow \delta = \alpha + \alpha' - \varphi$$

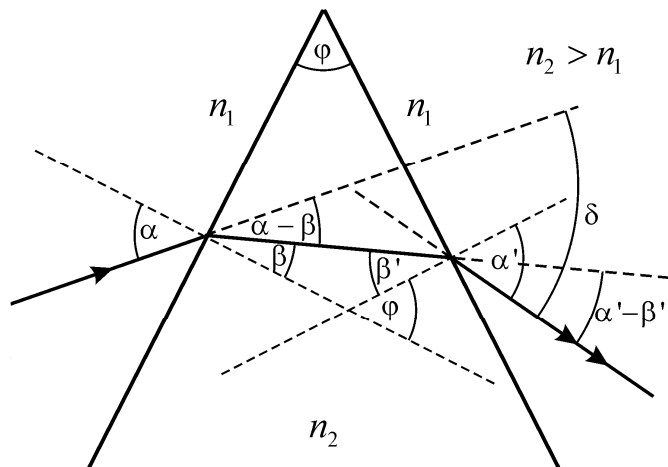
Uzimamo za indekse loma:

$n_1 = 1$ (za vakuum ili zrak, približno)

$n_2 = n$ (za prizmu)

Snellov zakon loma $\rightarrow \sin \alpha = n \sin \beta$

$$\sin \alpha' = n \sin \beta'$$



Optička prizma 3

$$\varphi = \beta + \beta'$$

$$\sin \alpha = n \sin \beta$$

$$\delta = \delta(\alpha, \alpha', \varphi)$$

$$\delta = \alpha + \alpha' - \varphi$$

$$\sin \alpha' = n \sin \beta'$$

Kut prizme i indeks loma materijala prizme su u određenom slučaju (za promatranu prizmu) zadani. $\rightarrow \beta'$ ovisi o β , dok β ovisi o $\alpha \rightarrow$

$$\delta = \delta(\alpha)$$

Kut devijacije prizme ovisi o upadnom kutu na prizmi.

Pokus – Uski snop na prizmu. \rightarrow Kut devijacije; zakrećemo prizmu oko njene uzdužne osi (upadni kut α povećavamo npr. od 0 do $\pi/2$) \rightarrow kut devijacije se smanjuje, dostiže minimalnu vrijednost (δ_m) i ponovno se povećava, premda prizmu zakrećemo i nadalje u istom smislu vrtnje.

Ponavljanjem pokusa i mjerenjem kuta upada te kuta izlaza iz prizme, može se zaključiti da δ_m nastupa kada je $\alpha = \alpha'$, odnosno $\beta = \beta'$.

Optička prizma 4

δ_m nastupa kada je $\alpha = \alpha'$, odnosno $\beta = \beta'$.

Dokaz:

Tražimo minimum funkcije: $\delta = \alpha + \alpha' - \varphi$

$$\delta = \alpha + \alpha' - \varphi$$

$$\sin \alpha' = n \sin \beta'$$

$$\sin \alpha = n \sin \beta$$

$$\varphi = \beta + \beta'$$

$$d\varphi = 0$$

$$d\beta' = -d\beta$$

$$\frac{d\delta}{d\alpha} = 1 + \frac{d\alpha'}{d\alpha}$$

$$\cos \alpha' d\alpha' = n \cos \beta' d\beta'$$

$$\cos \alpha d\alpha = n \cos \beta d\beta$$

∴

$$\frac{\cos \alpha' d\alpha'}{\cos \alpha d\alpha} = \frac{n \cos \beta' d\beta'}{n \cos \beta d\beta}$$

$$\frac{d\alpha'}{d\alpha} = \frac{\cos \beta' \cos \alpha d\beta'}{\cos \beta \cos \alpha' d\beta}$$

$$\frac{d\alpha'}{d\alpha} = -\frac{\cos \beta' \cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha'}$$

$$\frac{d\delta}{d\alpha} = \frac{\cos \beta \cos \alpha' - \cos \beta' \cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha'}$$

$$\frac{d\delta}{d\alpha} = 0$$

$$\cos \beta \cos \alpha' - \cos \beta' \cos \alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \alpha' ; \beta = \beta'$$

Optička prizma 5

δ_m nastupa kada je $\alpha = \alpha'$, odnosno $\beta = \beta'$.

Uvrstimo uvjet minimuma:

$$\varphi = 2\beta \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{\varphi}{2}$$

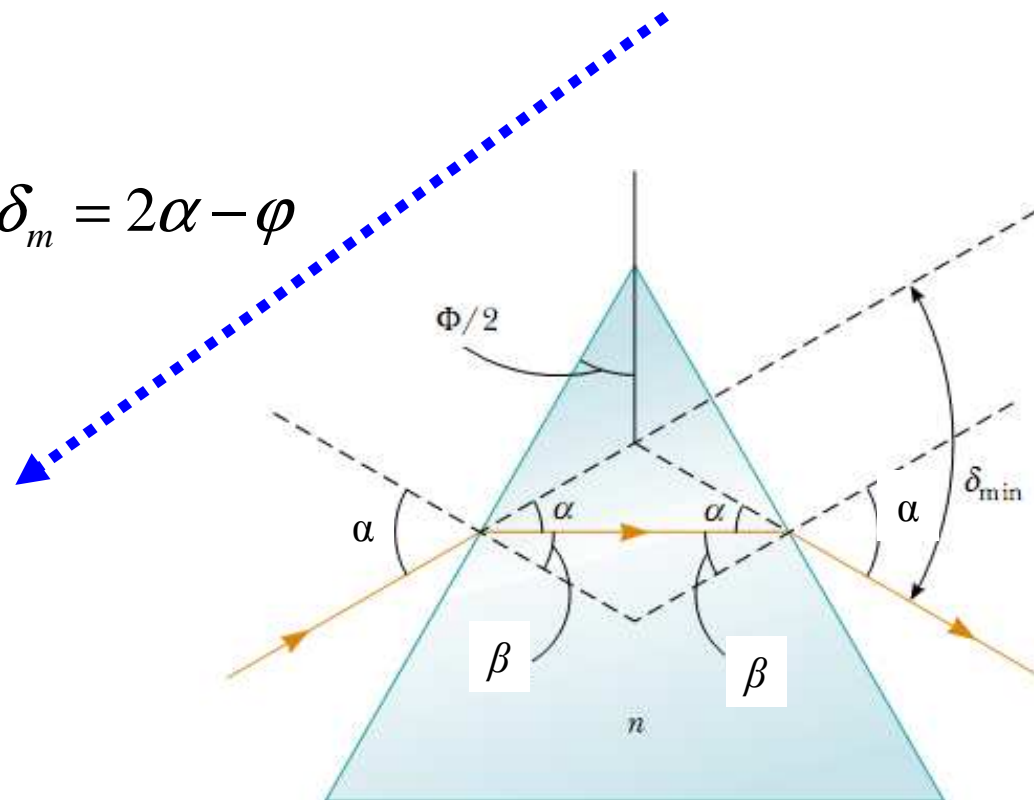
Minimum devijacije postaje:

Upadni kut: $\alpha = (\delta_m + \varphi) / 2$

$$\Rightarrow \quad n = \frac{\sin(\delta_m + \varphi) / 2}{\sin \varphi / 2}$$

$$\begin{aligned}\delta &= \alpha + \alpha' - \varphi \\ \sin \alpha' &= n \sin \beta' \\ \varphi &= \beta + \beta' \\ \sin \alpha &= n \sin \beta\end{aligned}$$

$$\delta_m = 2\alpha - \varphi$$



Mjerenjem kuta minimuma devijacije δ_m i kuta prizme φ omogućuje određivanje indeksa loma prizme n .

Optička prizma 6

Za male kutove \rightarrow vrijednosti sinusa zamijenimo približno s vrijednostima kuta \rightarrow

$$n = \frac{\sin(\delta_m + \varphi) / 2}{\sin \varphi / 2}$$

$$n \approx \frac{(\delta_m + \varphi)}{\varphi} \quad \rightarrow$$

$$\delta_m \approx (n - 1) \varphi$$

Kut devijacije δ_m karakteriziran je materijalom prizme (indeksa loma n)

Kako izmjeriti indeks loma neke tekućine pomoću prizme?

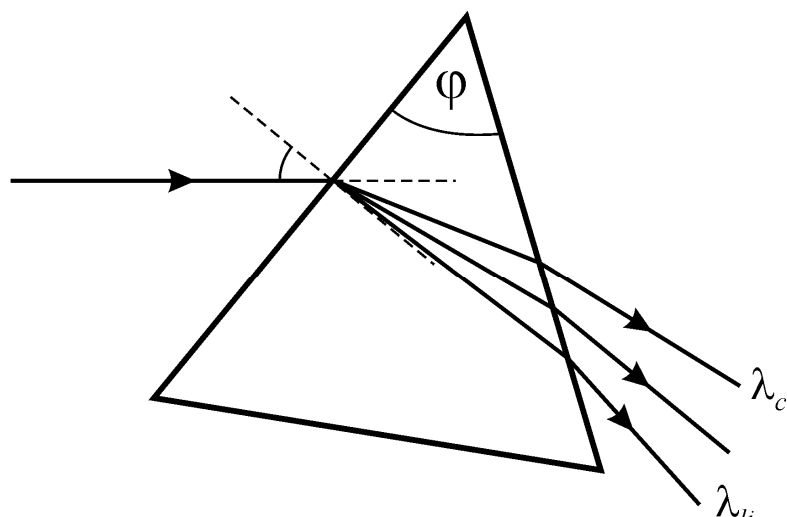
Uliti tekućinu u šuplju prizmu i odrediti kutove φ i δ_m .

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\Phi + \delta_{\min}}{2}\right)}{\sin(\Phi/2)}$$

Disperzija svjetlosti

Pojava zavisnosti indeksa loma nekog sredstva o valnoj duljini svjetlosti.

Primjer: Prolaz vidljive bijele ili polikromatske svjetlosti kroz prizmu.

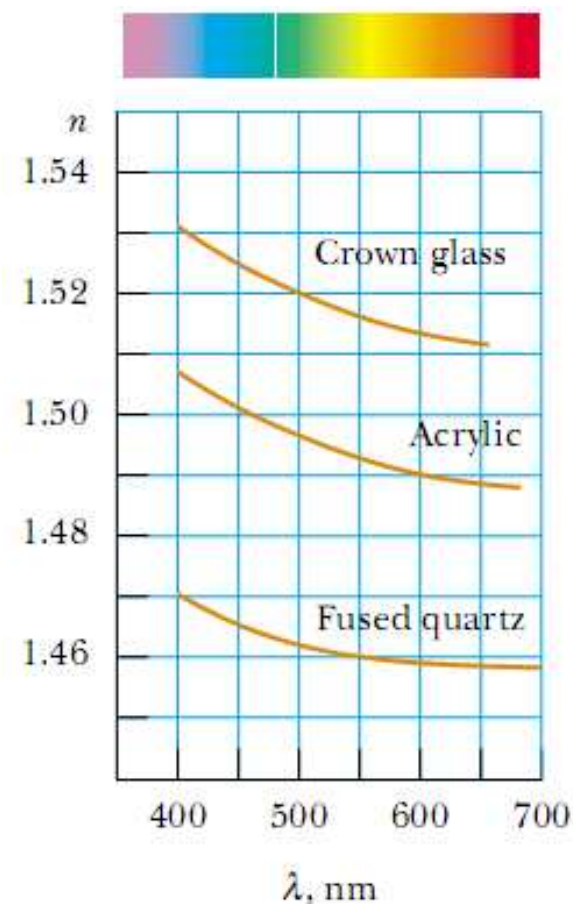


Pravilo: Na prizmi se više lomi i ima veći kut devijacije svjetlost kraće valne duljine.

Područje vidljive svjetlosti:
od ljubičaste ($\lambda_v = 400 \text{ nm}$)
do crvene ($\lambda_c = 750 \text{ nm}$)

Oko je najosjetljivije na zelenkastu svjetlost valne duljine 555 nm.

Prizma: Ljubičasta zraka se najviše lomi, a crvena najmanje.



Disperzija svjetlosti 2

Staklo – Materijal za građu prizmi. Dioptrijski materijal sastavljen od smjese oksida; neki nemetalni oksidi, kao SiO_2 i B_2O_3 , čine kostur za molekularnu građu stakla, a tome se dodaju (prije taljenja) pojedine komponente, kao metalni oksidi K_2O ili PbO i dr. → različita stakla

Krunsko staklo – Vrlo često u instrumentalnoj optici (kalcij-kalij-silikat staklo, s indeksom loma oko 1,5).

Flint staklo - Vrlo često u instrumentalnoj optici (kalij-olovo-silikat staklo), poznato i kao "kristal", s indeksom loma oko 1,8).

Moć disperzije prizme ϕ - Razlika kutova devijacije crvene i plave linije.

Za male kutove prizme: \Rightarrow $\delta_c = (n_c - 1)\varphi$ $\delta_p = (n_p - 1)\varphi$

\Rightarrow $\phi = \delta_p - \delta_c = (n_p - n_c)\varphi$

Spektrometar

Rastavljanjem neke polikromatske svjetlosti na sastavne boje, npr. pomoću prizme, dobivamo *spektar svjetlosti*.

Spektograf - Uređaj za dobivanje spektra svjetlosti; disperzijski i detekcijski dio

Spektroskop - Spektrograf za vizualno gledanje.

Spektrometar - Spektrograf za mjerenje valne duljine svjetlosti.

Spektrograf s prizmom - disperzijski uređaj je prizma od stakla

Spektrograf s optičkom mrežicom - spektar nastaje ogibom svjetlosti

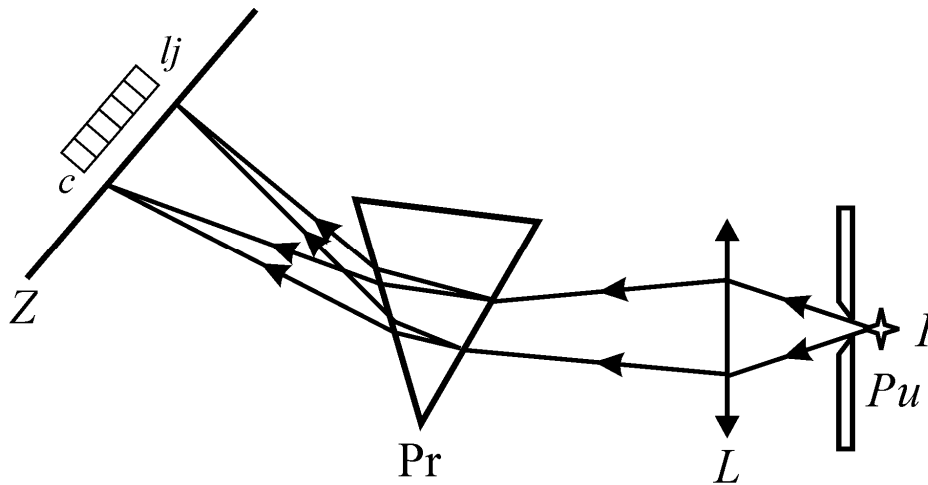
Za analizu spektra svjetlosti u ultraljubičastom području - prizma od kvarca

Za analizu spektra svjetlosti u infracrvenom području - prizme od natrij-bromida, kalij-bromida, i sl.

Spektrometar 2

Izvor svjetlosti - osvijetljena pravokutna dijafragma, tzv. pukotina, kroz koju svjetlost pada preko konvergentne leće na prizmu, gdje se rasipa i na zastoru nastaju obojene slike pukotine.

Na zastoru se nalazi detekcijski dio spektrografa (fotografska ploča, fotoćelija i dr.)



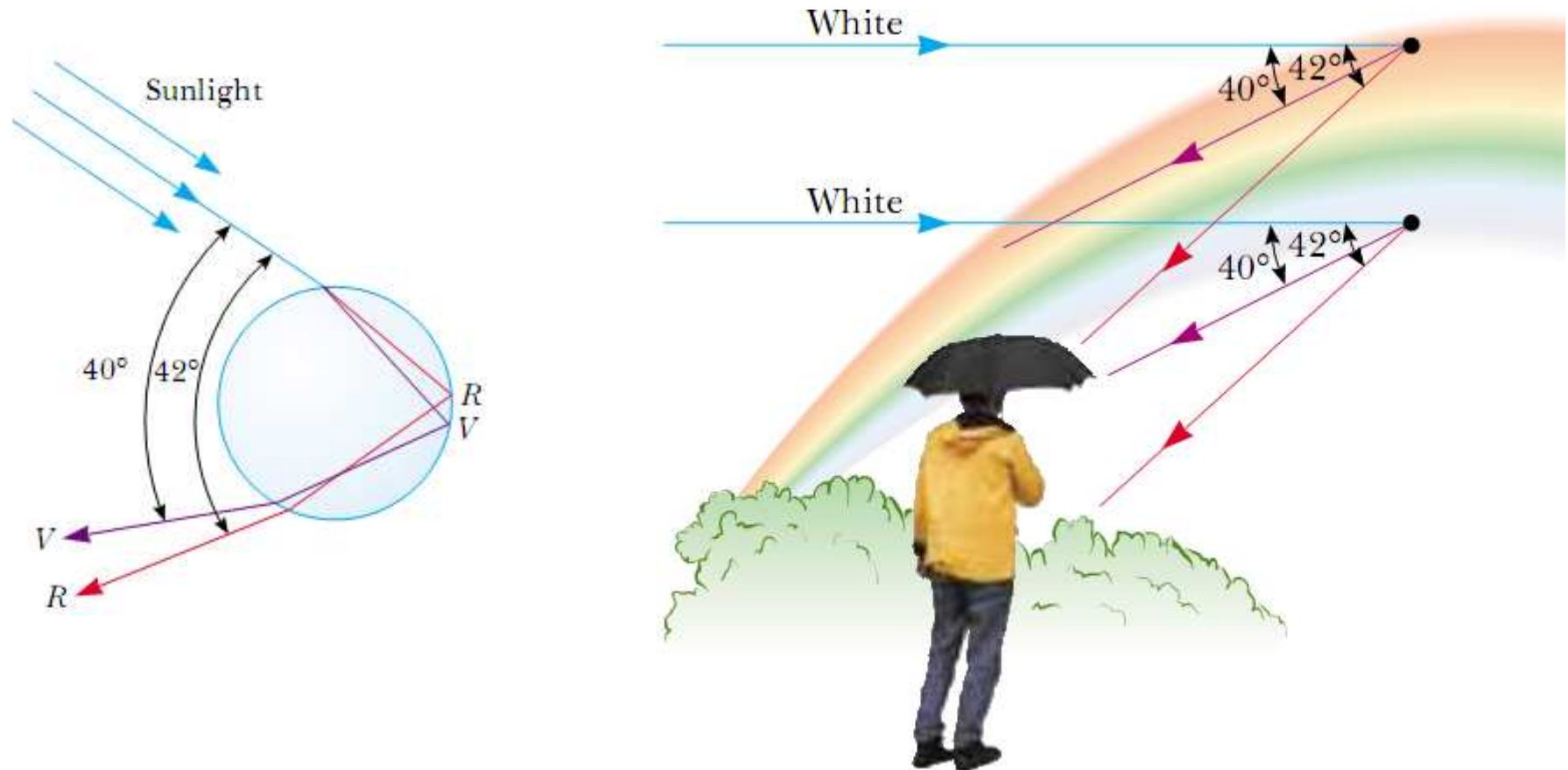
Ako detekcijski dio uređaja baždaramo za valne duljine. → uređaj služi kao spektrometar.

Pokus – U šuplju prizmu se ulije ugljik bisulfid (CS_2 ; $n_u = 1,62$), a iznad njega voda ($n_v = 1,33$). → dva spektra od jednog snopa upadne svjetlosti

Duga

Duga – Nastaje kombinacijom disperzije i unutarnjeg odbijanja (totalne refleksije) sunčeve svjetlosti na kapljama vode u zraku.

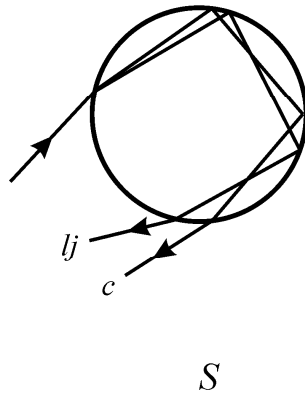
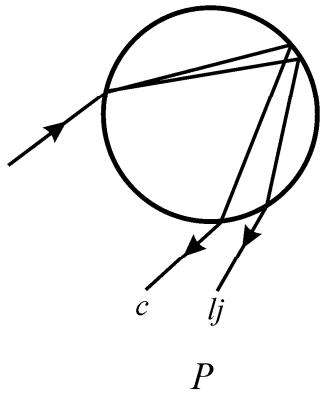
Nastanak - Povoljni uvjeti (glede kuta upadnih zraka, položaja motritelja i kapljica vode u zraku, npr. od kiše ili blizine vodopada)



Dvije vrste duge:

a) unutarnja (ili primarna, P), sjajnija, izvana crvena, unutra ljubičasta

b) vanjska (ili sekundarna, S) duga, koja ima obrnut redoslijed boja



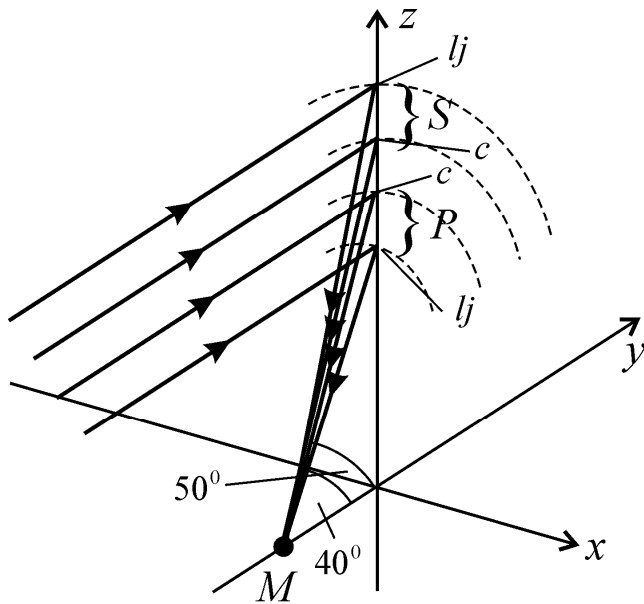
Duga P nastaje od zraka koje se jedanput odbijaju i dva puta lome.

Dugu S daju zrake koje se dva puta odbijaju (otud manje svjetla) i također dva puta lome; zato je redoslijed boja u dugi S obrnut

Duga 2

Duga – Nastaje kombinacijom disperzije i unutarnjeg odbijanja (totalne refleksije) sunčeve svjetlosti na kapljama vode u zraku.

Kad sunčeve zrake upadaju horizontalno na kapljice vode u atmosferi, motritelj vidi donju ljubičastu boju duge P pod kutom od 40° prema vertikali (gornju crvenu boju duge P vidi pod kutom od 42°).



Motritelj donju crvenu boju duge S vidi pod kutom od 50° (gornju ljubičastu boju duge S vidi pod kutom od 54°)

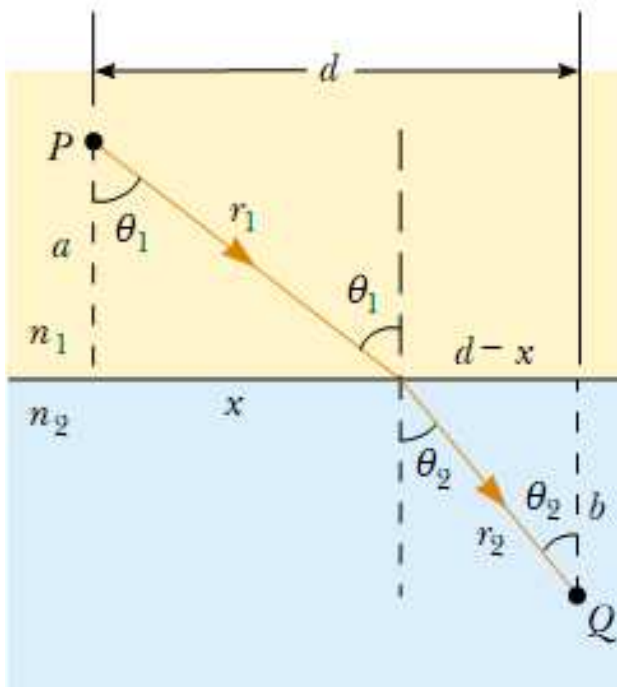
Fermatov princip

Pierre de Fermat (1601-1665)

- princip određivanja putanje zrake svjetlosti od početne do konačne točke

Kada svjetlost putuje između bilo koje dvije točke, njena putanja je ona koja zahtijeva najmanje vremena.

- homogeni medij: putanja je pravac
- prijelaz između dva optička sredstva: Snellov zakon loma



-vrijeme potrebno da svjetlost dođe iz točke P u Q:

$$t = \frac{r_1}{v_1} + \frac{r_2}{v_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{c/n_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{c/n_2}$$

-tražimo putanju koja daje najkraće vrijeme:

$$dt/dx=0$$

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \frac{n_1}{c} \frac{d}{dx} \sqrt{a^2 + x^2} + \frac{n_2}{c} \frac{d}{dx} \sqrt{b^2 + (d-x)^2} \\ &= \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{2}\right) \frac{2x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} + \frac{n_2}{c} \left(\frac{1}{2}\right) \frac{2(d-x)(-1)}{[b^2 + (d-x)^2]^{1/2}} \\ &= \frac{n_1 x}{c(a^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{n_2(d-x)}{c[b^2 + (d-x)^2]^{1/2}} = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{n_1 x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} = \frac{n_2(d-x)}{[b^2 + (d-x)^2]^{1/2}}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{x}{(a^2 + x^2)^{1/2}} \quad \sin \theta_2 = \frac{d-x}{[b^2 + (d-x)^2]^{1/2}}$$

$$\boxed{n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2} \quad \text{Snellov zakon loma}$$

-na sličan način (koristeći Fermatov princip) može se izvesti i zakon za odbijanje (refleksiju) svjetlosti