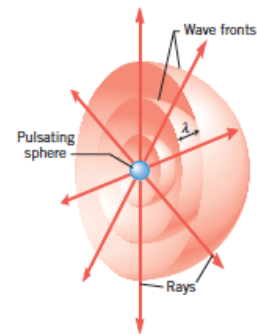


## 25. REFLEKSIJA SVJETLOSTI

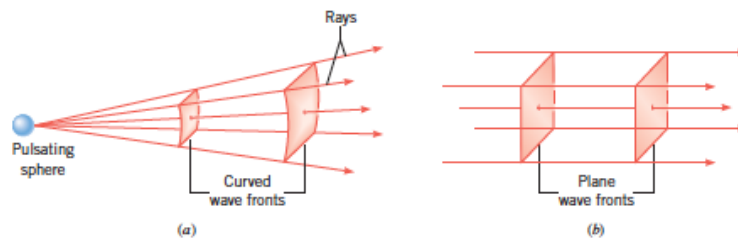
(pripremljeno prema poglavljima 25, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

**Valne fronte i zrake.** Ogledala svakodnevno koristimo. Slike koje vidimo u ogledalima nastaju jer se dio svjetla koje pada na njih reflektira i dopijeva u naše oči. Da bismo razmotrili refleksiju, potrebno je uvesti koncepte valne fronte i zrake svjetlosti.

Razmotrimo valove koji se šire iz malog sfernog izvora. Emitirani se val rasprostire sferno iz izvora te širi konstantnom brzinom. Da bismo predstavili ovaj val, crtamo površine kroz točke vala koje su u istoj fazi kretanja. Te se površine nazivaju se *valnim frontama*. Na slici desno prikazani su hemisferne valne fronte. Uočimo da je udaljenost valnih fronti jednaka valnoj duljini. Radijalne linije koje su usmjerene prema van od izvora i okomite na valne fronte nazivaju se *zrake*. Zrake upućuju na smjer širenja vala.

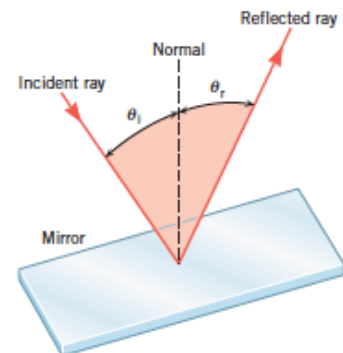


Na slici dolje prikazani su mali presjeci dviju susjednih valnih fronti. Na velikim udaljenostima od izvora valne fronte postaju sve manje zakrivljene i približavaju se obliku ravnih površina, kao u (b) dijelu slike. Valovi čija su valne fronte ravne površine nazivaju se *ravni valovi* i važni su u razumijevanju svojstava zrcala i leća. Budući da su zrake okomite na valnu frontu, zrake za ravni val su paralelne jedna s drugom.



Pojmovi valnih fronti i zraka često se koriste za opisivanje svjetlosnih valova. Za svjetlosne valove, pojam zračenja posebno je prikladan kada pokazuje putanju kojom svjetlost putuje. Često ćemo koristiti pojam zrake svjetlosti, koje se u osnovi mogu smatrati uskim snopovima svjetlosti, poput onih koje stvaraju laseri.

**Refleksija svjetlosti.** Većina objekata reflektira (odbija) dio svjetlosti koji padne na njih. Pretpostavimo da zraka svjetlosti upada na ravnju, sjajnu površinu, poput zrcala na slici desno. Kao što pokazuje crtež, možemo definirati kut upada  $\theta_i$  kao kut između upadne zrake i normale (normala je linija okomita na površinu). Kut refleksije  $\theta_r$  je kut između reflektirane zrake i normale. Zakon refleksije opisuje ponašanje upadne i reflektirane zrake.



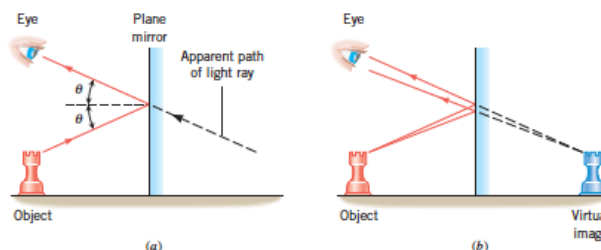
**Zakon refleksije.** Upadna zraka, reflektirana zraka i normala na površinu leže u istoj ravnini, dok je kut refleksije  $\theta_r$  jednak upadnom kutu  $\theta_i$ :

$$\theta_r = \theta_i$$

**Predmet i slika predmeta za ravno zrcalo.** Kad pogledate u ravno zrcalo, vidite svoju sliku koju možemo opisati s tri svojstva:

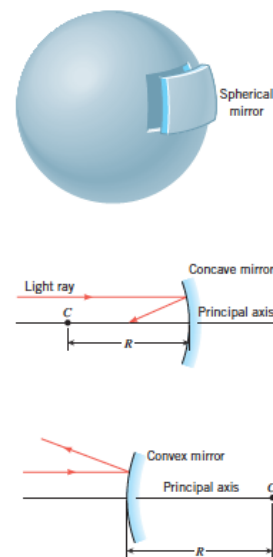
1. Slika je uspravna.
2. Slika je jednake veličine kao i mi.
3. Slika se nalazi iza zrcala točno onoliko koliko smo mi udaljeni od zrcala.

Da bismo mogli razumjeti kako nastaje slika u ravnom zrcalu, promotrimo sliku desno. Crvenom je linijom prikazana zraka svjetlosti koja izlazi iz vrha predmeta. Ta se zraka odbija od zrcala (kut refleksije jednak je kutu upada) i ulazi u naše oko. Na slici (b) prikazane su dvije zrake koje napuštaju vrh predmeta. Odbijene zrake se ne sijeku, ali ukoliko ih produžimo iza ogledala, kako je prikazano crtkanim linijama, dobit ćemo mjesto gdje se sjeku. Za promatrača, slika koju vidi nalazi se upravo na mjestu gdje se ove isprekidane linije sijeku. Za svaku točku predmeta, na slici postoji jedna točka koja joj odgovara te je upravo zbog toga slika u ravnom zrcalu oštra i neiskrivljena.



Budući da niti jedna od svjetlosnih zraka zapravo ne dolazi iz slike predmeta, već izgledaju kao da dolaze iz slike iza ogledala, ovakve se slike nazivaju prividnima. Kasnije ćemo naučiti da slike mogu biti stvarne ili prividne, što ovisi o optičkom sustavu koji se razmatra.

**Sferna zrcala.** Najčešća vrsta zakrivljenog zrcala su sferna zrcala. Kao što prikazuje slika desno, sferno zrcalo ima oblik presjeka površine šuplje kugle (sfere). Ako je unutarnja površina zrcala reflektirajuća, tada se takvo zrcalo naziva konkavno zrcalo. S druge strane, ako je vanjska površina zrcala reflektirajuća, to je konveksno zrcalo. Na crtežu su prikazane obje vrste zrcala te što se u svakom slučaju dogodi kad se zraka svjetlosti odbije od reflektirajuće površine. Primjenjuje se zakon refleksije, što znači da se treba odrediti normala, crta okomita na zrcalo, te iz kuta između normale i zrake odrediti smjer reflektirane zrake. Sferno zrcalo karakterizira središte sfere, koje se nalazi u točki  $C$  te polumjer zakrivljenosti, koji iznosi  $R$ . Glavna os zrcala je ravna crta koja prolazi kroz točku  $C$  i točku u sredini zrcala. Način konstrukcije slike za sferna zrcala nećemo obrađivati, ali ukoliko vas to zanima proučite poglavlje 25 iz udžbenika.



## 26. LOM SVJETLOSTI: LEĆE I OPTIČKI INSTRUMENTI

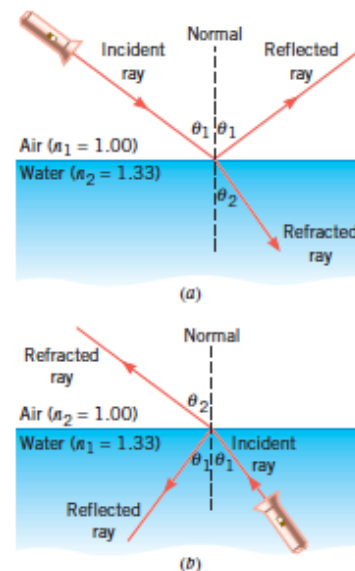
(pripremljeno prema poglavljima 26, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

**Indeks loma.** Svjetlost putuje kroz vakuum brzinom  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Također, svjetlost može prolaziti kroz mnoga sredstva, poput zraka, vode i stakla. Međutim, zbog interakcije svjetlosti i sredstva kroz koji putuje, brzina svjetlosti kroz sredstvo je manja od  $c$ . Koliko će se brzina smanjiti ovisi o prirodi sredstva. Vidjet ćemo da će zbog promjene brzine svjetlosti prilikom prijelaza iz jednog sredstva u drugo, doći do promjene smjera zrake, što se naziva lom svjetlosti ili refrakcija.

**Definicija indeksa loma.** Za neko sredstvo, indeks loma,  $n$ , se definira kao omjer brzine,  $c$ , svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u tom sredstvu,  $v$ :

$$n = \frac{\text{Brzina svjetlosti u vakuumu}}{\text{Brzina svjetlosti u sredstvu}} = \frac{c}{v} \quad (26.1)$$

**Snellov zakon i lom svjetlosti.** Kad svjetlost padne na spoj dva prozirna sredstva, poput zraka i vode, svjetlost se obično podijeli na dva dijela, kao što prikazuje slika desno. Dio svjetlosti se odbije, pri čemu je kut refleksije jednak kutu upada. Ostatak prolazi ulazi u drugo sredstvo. Kad zraka uđe u drugo sredstvo i promijeni smjer, kaže se da je došlo do *loma svjetlosti (refrakcije)*. Ako svjetlost putuje iz sredstva manjeg indeksa loma u sredstvo većeg indeksa loma, zraka se lomi u odnosu na normalu, kao na slici desno (a). Ukoliko je obrnuta situacija i svjetlost putuje iz sredstva većeg indeksa loma u sredstvo manjeg indeksa loma, zraka svjetlosti se lomi kao na slici desno (b). U oba dijela kutovi upada i loma se mjere u odnosu na normalnu. Imajte na umu da je indeks loma zraka u dijelu (a) označen  $n_1$ , dok je u dijelu (b) označen  $n_2$ .



Kut loma,  $\theta_2$ , ovisi o upadnom kutu  $\theta_1$  i o indeksima loma ta dva sredstva,  $n_1$  i  $n_2$ . Odnos između tih veličina poznat je kao Snellov zakon loma, a otkrio ga nizozemski matematičar Willebrorda Snell (1591-1626).

**Snellov zakon loma.** Kad svjetlost putuje iz materijala indeksa loma  $n_1$  u materijal indeksa loma  $n_2$ , lomljena zraka, upadna zraka i normalna na granicu dva sredstva leže u istoj ravnini. Kut loma,  $\theta_2$ , povezan je s upadnim kutom  $\theta_1$  preko relacije

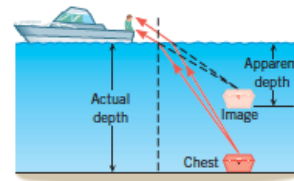
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (26.2)$$

**Prividna dubina.** Jedna zanimljiva posljedica loma svjetlosti je da se objekt koji leži pod vodom čini bliže površini nego što zapravo jest. Ukoliko s broda promatramo škrinju potopljenu u vodu (slika dolje), zrake svjetlosti prolaze kroz vodu prema gore, te se lome prilikom prijelaza u zrak. Da bismo konstruirali sliku koju vidi promatrač

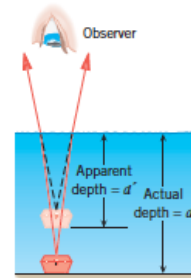
na brodu, produljit ćemo zrake koje su došle do promatrača (vidi isprekidane linije). Ove linije pokazuju da promatrač vidi škrinju na prividnoj dubini koja je manja od stvarne dubine. Slika je prividna jer svjetlosne zrake zapravo ne dolaze iz te slike. Za situaciju prikazanu na slici (a) teško je odrediti prividnu dubinu. Mnogo je jednostavniji slučaj prikazan u dijelu (b), gdje je promatrač neposredno iznad potopljenog objekta, a prividna dubina  $d'$  povezana je sa stvarnom dubinom  $d$  preko relacije

$$d' = d \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (26.3)$$

U tom je rezultatu  $n_1$  indeks loma sredstva kroz koje prolazi upadna zraka, dok je  $n_2$  indeks sredstva kroz koje prolazi lomljena zraka,  $n_1$  (tamo gdje se nalazi promatrač). Izvod ove jednadžbe je u udžbeniku.

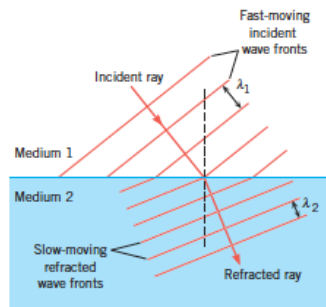


(a)

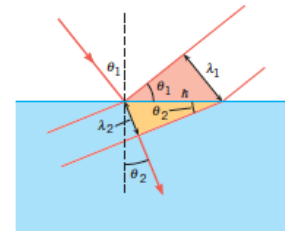


(b)

**Izvod Snell-ovog zakona.** Da bismo izveli Snellov zakon razmotrimo što se događa s valnim frontama kada svjetlost prelazi iz jednog sredstva u drugo. Slika desno (a) prikazuje svjetlost koja se putuje sredstvom 1 u kojem ima brzinu veću od brzine u sredstvu 2. Dakle,  $n_1$  je manji od  $n_2$ . Valne fronte upadne svjetlosti su plohe koje su okomite na zraku svjetlosti, a isto vrijedi za valnu frontu i zraku lomljene svjetlosti.



(a)



(b)

Premda upadna i lomljena svjetlost imaju različite brzine, ta dva vala imaju istu frekvenciju,  $f$ . Da bismo razumjeli zašto imaju istu frekvenciju, promotrimo što se događa kad svjetlost dođe do granice između dva sredstva. Svjetlost je elektromagnetski val koji stvara oscilirajuće električno polje te time prisiljava elektrone da osciliraju istom frekvencijom kao i val. Zbog toga ti elektroni zrače elektromagnetske valove koji su iste frekvencije kao i izvorni val te se oni zbrajaju. Budući da dodatni val ima istu frekvenciju kao i izvorni val, lomljeni val također ima istu frekvenciju kao i izvorni val.

Udaljenost između susjednih valnih fronti na slici (a) gore, upravo je valna duljina. Budući da su frekvencije iste u oba sredstva, a brzine različite, za njihove valne duljine vrijedi:  $\lambda_1 = v_1/f$  te  $\lambda_2 = v_2/f$ . Na slici (b) prikazan je uvećan prikaz upadnih i lomljenih fronti. Kutovi  $\theta_1$  i  $\theta_2$  unutar obojenih trokuta su kutovi upadne i lomljene zrake. Također, oba trokuta dijele istu hipotenuzu  $h$ . Stoga vrijedi,

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{h} = \frac{v_1/f}{h} = \frac{v_1}{hf}$$

te vrijedi

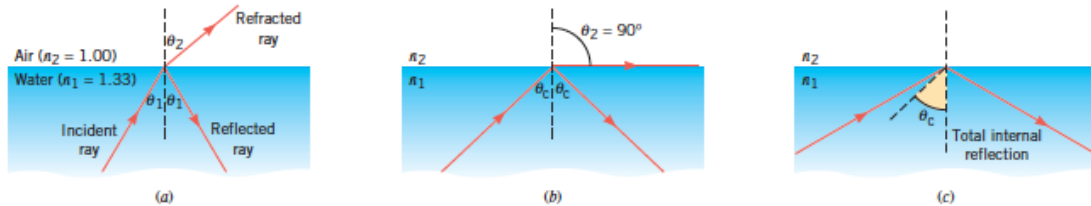
$$\sin \theta_2 = \frac{\lambda_2}{h} = \frac{v_2/f}{h} = \frac{v_2}{hf}$$

Oba ova izraza imaju zajednički član  $hf$  pa ukoliko izdvojimo taj član iz obje jednačbe dobivamo da vrijedi

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

Ukoliko pomnožimo obje strane s brzinom svjetlosti u vakuumu,  $c$ , i prepoznamo da je omjer  $c/v = n$ , dobivamo Snellov zakon loma:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ .

**Totalna refleksija.** Kad svjetlost prelazi iz sredstava većeg indeksa loma u drugo sredstvo manjeg indeksa loma, kao što se događa kad prelazi iz vode u zrak, dolazi do loma svjetlosti, kao što je prikazano na slici dolje. S povećanjem upadnog kuta, povećava se i kut loma (usporedi slike (a) i (b)). Za određenu vrijednost upadnog kuta, koja se naziva *kritični kut*  $\theta_c$ , kut loma ima vrijednost  $90^\circ$ . Ta je situacija prikazana na slici (b). Kada je kut upada veći od kritičnog kuta, kao na slici (c), više nema loma svjetlosti te se sva upadna svjetlost reflektira natrag u sredstvo iz kojeg je stigla. Ta se pojava zove *totalna refleksija*. Uočimo da se ta pojava ne događa se kada se svjetlost širi u obrnutom smjeru, na primjer iz zraka u vodu.

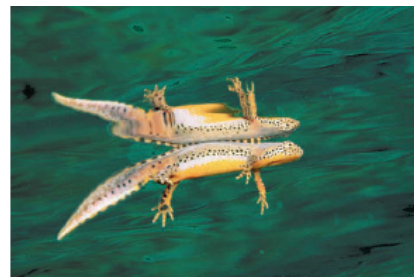


Izraz za kritični kut  $\theta_c$  može se dobiti iz Snell-ovog zakona ukoliko uzmemo da je  $\theta_1 = \theta_c$  te  $\theta_2 = 90^\circ$  (vidi sliku (b)):

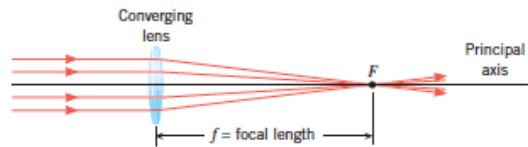
$$\sin \theta_c = \frac{n_2 \sin 90^\circ}{n_1}$$

Kritični kut  $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad (26.4)$

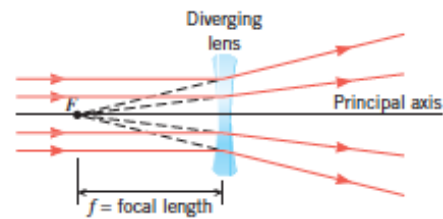
Dakle, svjetlosne zrake s kutom upada većim kritičnog kuta se ne lome, što znači da se svjetlost potpuno reflektira natrag u sredstvo, kao što pokazuje slika gore (c). Na primjer, u slučaju prelaska iz vode u zrak granica između ova dva sredstva djeluje poput ogledala. Slika desno je napravljena iz vode te prikazuje zrcaljenje na granici između vode i zraka.



**Leće.** Leće koje se koriste u optičkim instrumentima, poput naočala, kamera i teleskopa, izrađene su od prozirnih materijala koji lome svjetlost. Leće su dizajnirane tako da lome svjetlost na način da se formira slika objekta s kojeg dolazi svjetlost. Na slici desno prikazana je leća s pravilno zakrivljenim površinama, često sfernim. Zrake koje su blizu glavne osi i paralelne su s njom, nakon što izađu iz leće, se lome te se sijeku u jednoj točki na glavnoj osi. Ta se točka zove žarište leće  $F$ . Udaljenost između žarišta i leće zove se žarišna duljina  $f$ . Leće s ovakvim svojstvima zovu se konvergentne leće.

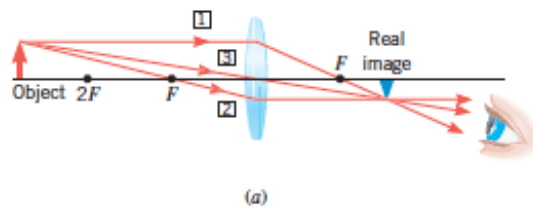


Druga vrsta leća koja se nalazi u optičkim instrumentima je divergentna leća. Zrake svjetlosti koja prolazi kroz takve leće razilaze se nakon izlaska iz leće. Ukoliko se pogleda kako izgledaju zrake koje izlaze iz ove leće, čini se da sve one dolaze iz jedne točke koja se nalazi ispred leće, na glavnoj (optičkoj) osi. Ta je točka žarište  $F$ , a njegova udaljenost od leće je žarišna duljina  $f$ . Za obje leće, konvergentne i divergentne, smo pretpostavili da je leća tanka u odnosu na žarišnu duljinu.

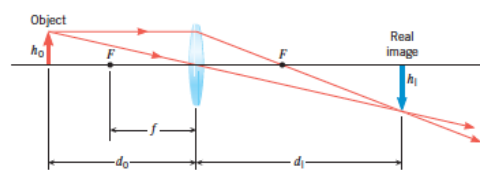


### Konstrukcija slike dobivene lećom.

Svaka točka na nekom predmetu emitira svjetlosne zrake u svim smjerovima, a kada neke od tih zraka prođu kroz leću, one formiraju sliku. Za određivanje položaja i veličine slike možemo koristiti bilo koje dvije od tri karakteristične zrake, koje su prikazane na slici desno. Dijagram u kojem su prikazane zrake pokazuje da je slika u ovom primjeru stvarna, obrnuta i manja od predmeta.



**Jednadžba tanke leće.** Kad se predmet postavi ispred leće, praćenjem karakterističnih zraka možemo odrediti mjesto, veličinu i prirodu slike tog predmeta. Jednadžba tanke leće određuje nam udaljenost slike od leće, za poznatu vrijednost žarišne duljine  $f$ . Za objekt postavljen ispred objektiva, te korištenjem Snellovog zakon loma mogu se izvesti odgovarajuće jednadžbe. Dakle, ukoliko je udaljenost predmeta od leće  $d_0$  i udaljenost slike od leće  $d_1$ , vrijedi sljedeća relacija:



$$\text{Jednadžba tanke leće} \quad \frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f} \quad (26.6)$$

dok za povećanje,  $m$ , vrijedi

$$\text{Povećanje} \quad m = \frac{\text{Visina slike}}{\text{Visina predmeta}} = \frac{h_1}{h_0} = -\frac{d_1}{d_0} \quad (26.7)$$

**Sustav dvije leće. Mikroskop.** Mnogi optički instrumenti, poput mikroskopa i teleskopa, koriste više leća za dobivanje slike. Sustav od više leća može stvoriti znatno uvaćanu sliku, u odnosu na sliku dobivenu jednom lećom. Na primjer, na slici dolje prikazan je sustav od dvije leće koji se koristi u mikroskopu. Prva leća, leća koja je bliža predmetu, naziva se objektivom. Druga leća naziva se okular. Predmet se postavlja nedaleko od žarišta  $F_0$ . Slika koja nastaje prolaskom svjetlosti kroz prvu leću (prva slika) je stvarna, obrnuta i uvećana u odnosu na predmet. Ta prva slika služi kao predmet za drugu leću, okular. Položaj okulara je tako postavljen da se prva slika nalazi između okulara i njegova žarišta  $F_e$ . Konačno, promatrač koji promatra kroz okular vidi uvećanu, prividnu i obratnu sliku predmeta, koja je na slici dolje označena kao "Final image":

