

Lom svjetlosti

LEĆE I OPTIČKI INSTRUMENTI

FIZIKA
PSS-GRAD
22. siječnja 2025.



WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

26.1 Indeks loma

Kroz vakuum, svjetlost putuje brzinom $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Kroz tvar, svjetlost putuje brzinom **manjom** od brzine svjetlosti u vakuumu.

DEFINICIJA INDEKSA LOMA

Indeks loma neke tvari jednak je omjeru brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u tvari:

$$n = \frac{c}{v}$$

26.1 Indeks loma

lom = refrakcija

odbijanje = refleksija



INDEKS LOMA NEKIH MATERIJALA

plinovi na 0°C i 1 atm

zrak	1,000293
ugljičkov dioksid	1,000450
kisik	1,000271
vodik	1,000139

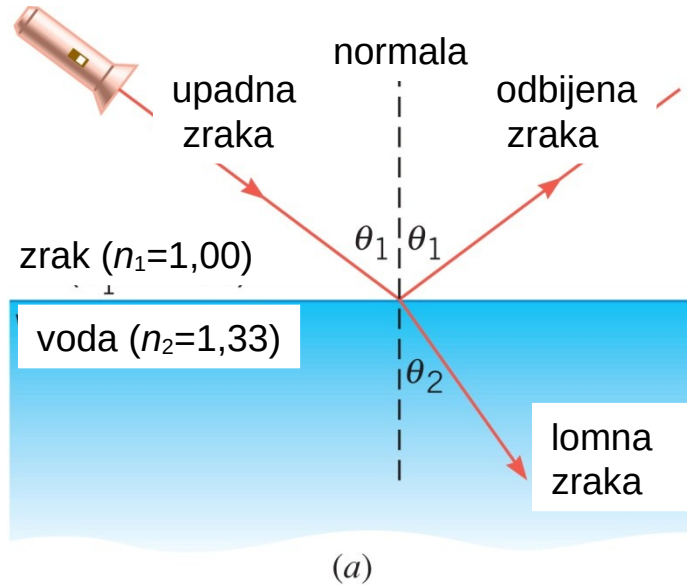
tekućine na 20°C

benzen	1,501
ugljičkov disulfid	1,632
ugljičkov tetraklorid	1,461
etanol	1,362
voda	1,333

krutine na 20°C

dijamant	2,419
silicijevo staklo	1,458
natrijev klorid	1,544

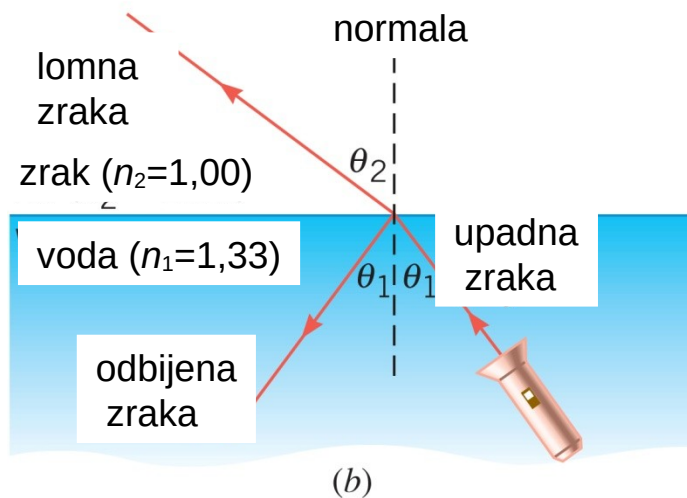
SNELLOV ZAKON



SNELLOV ZAKON LOMA

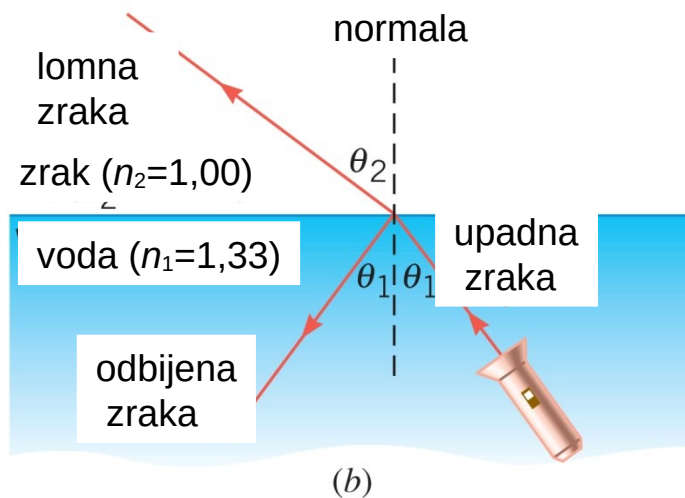
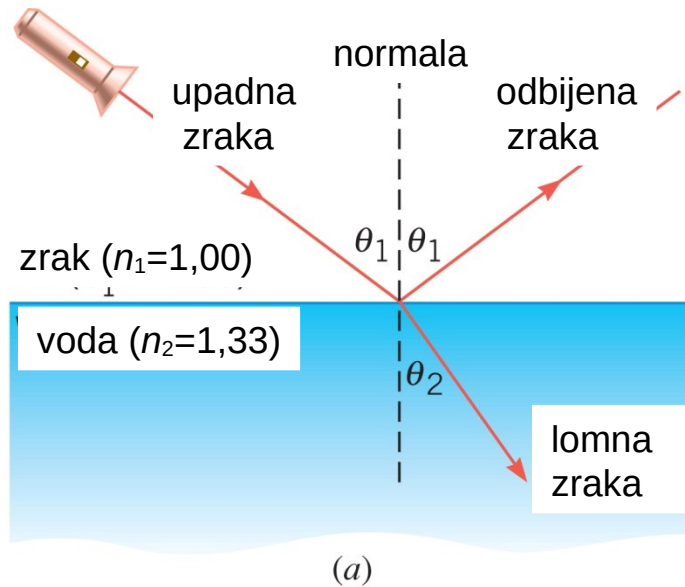
Kad svjetlost putuje iz tvari s jednim indeksom loma u tvar s drugim indeksom loma, onda se upadni kut i kut loma odnose se kao:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

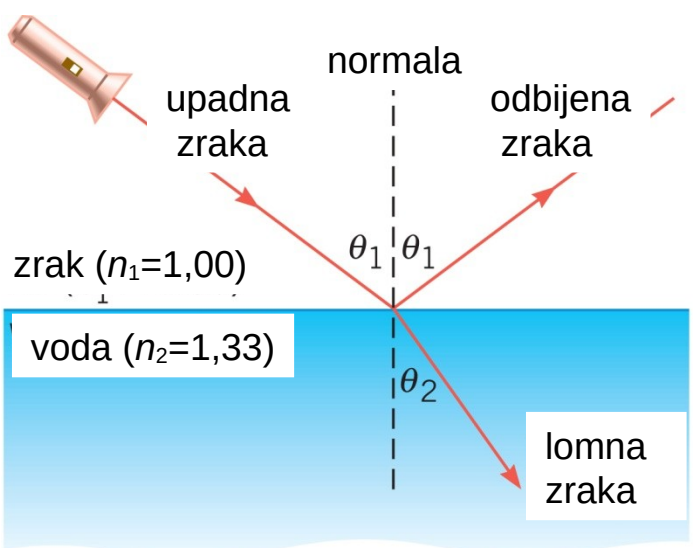


Primjer 1 Određivanje kuta loma

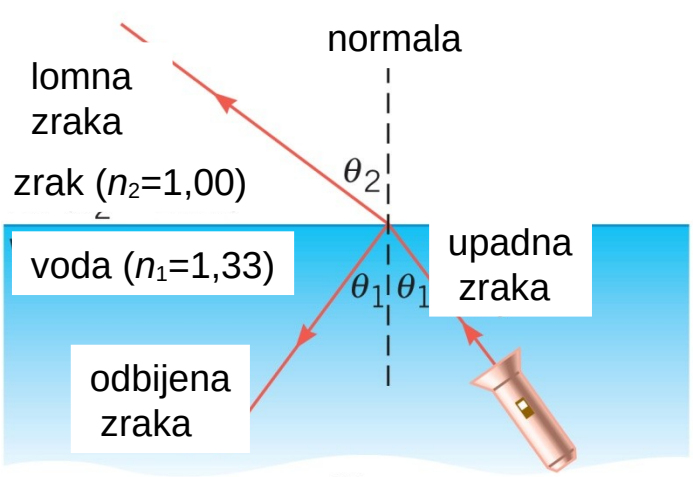
Zraka svjetlosti upada pod kutom od 46° s obzirom na normalu.
Oredite kut loma ako zraka upada:
(a) iz zraka u vodu
(b) iz vode u zrak



26.2 Snellov zakon i lom svjetlosti



(a)



(b)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

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

(a)
$$\sin \theta_2 = \frac{1,00 \sin 46^\circ}{1,33}$$

$$\theta_2 = 33^\circ$$

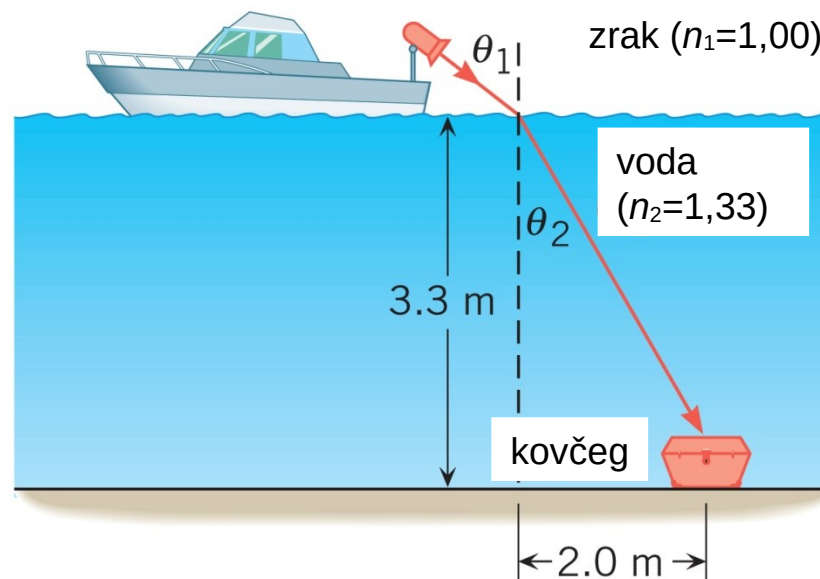
iz optički rjeđeg u optički gušći medij
→ lom **prema** okomici

(b)
$$\sin \theta_2 = \frac{1,33 \sin 46^\circ}{1,00}$$

$$\theta_2 = 73^\circ$$

iz optički gušćeg u optički rjeđi medij
→ lom **od** okomice

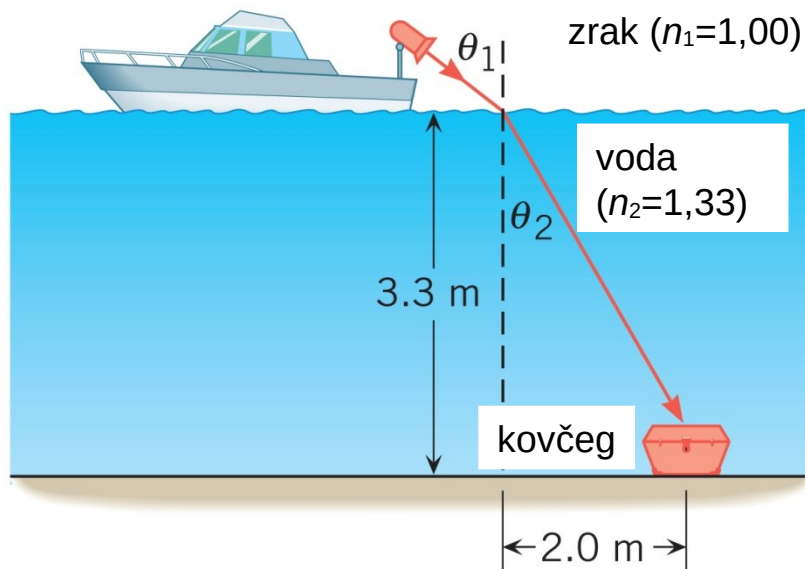
PRIVIDNA DUBINA



Primjer 2 Pronalaženje potonulog kovčega

Snop svjetlosti usmjeren je s jahte prema dnu gdje leži potonuli kovčeg. Pod kojim kutom snop mora biti usmjeren da bi osvjetljavao kovčeg?

26.2 Snellov zakon i lom svjetlosti



$$\tan \theta_2 = \frac{2,0\text{ m}}{3,3\text{ m}}$$

$$\theta_2 = 31^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

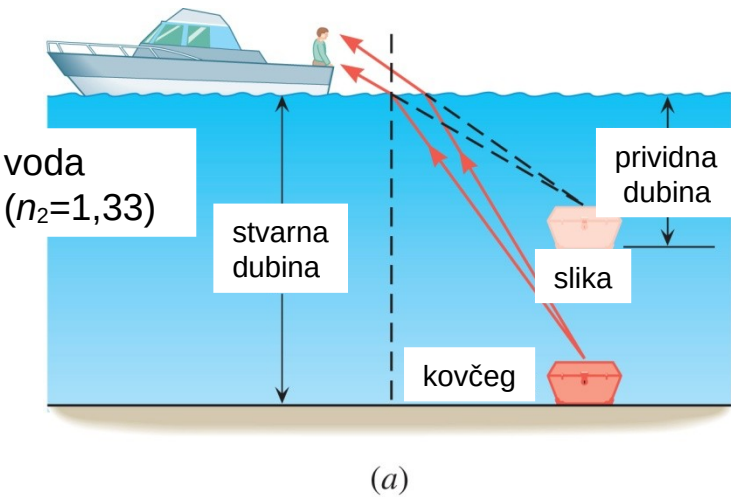
$$\sin \theta_1 = \frac{n_2 \sin \theta_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{1,33 \sin 31^\circ}{1,00}$$

$$\theta_1 = 44^\circ$$

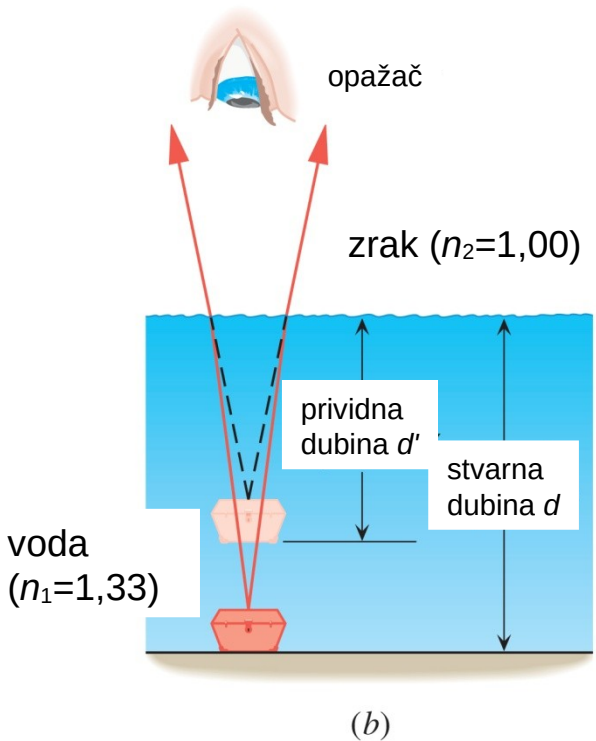
WILEY

26.2 Snellov zakon i lom svjetlosti

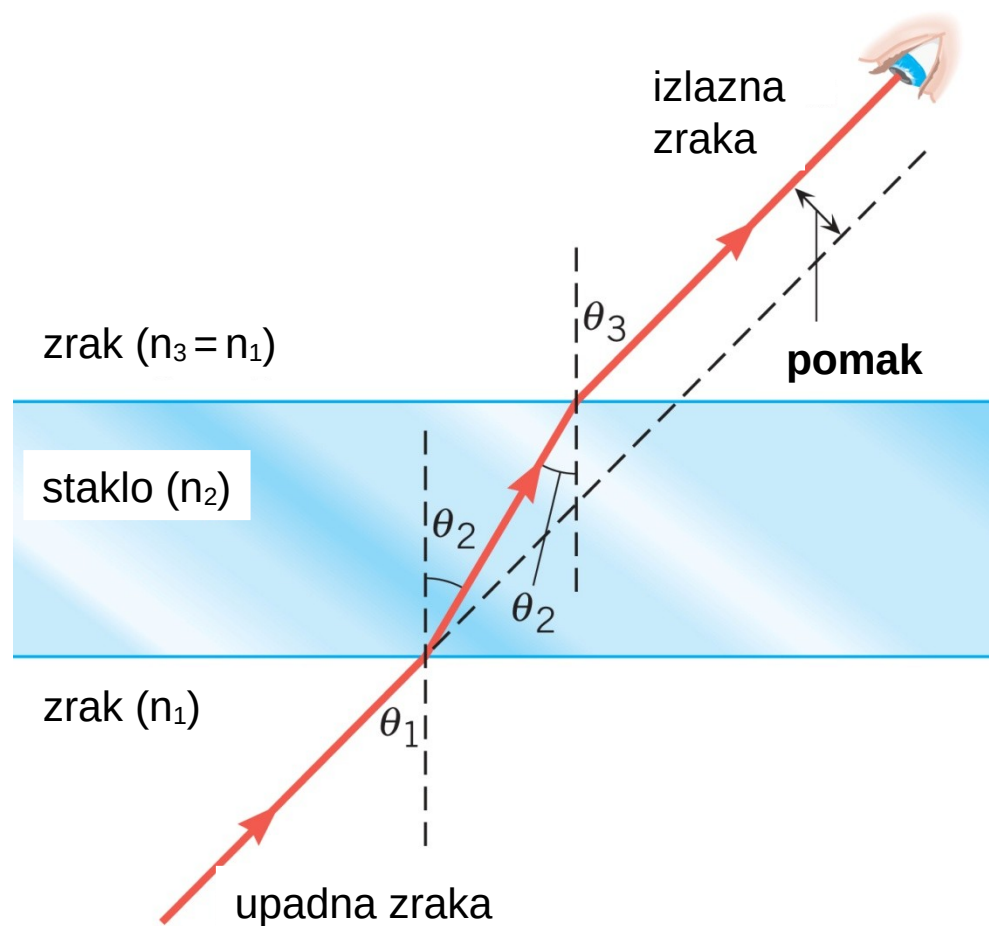


$$d' = d \frac{n_2}{n_1}$$

prividna dubina za opažača koji gleda okomito prema dnu

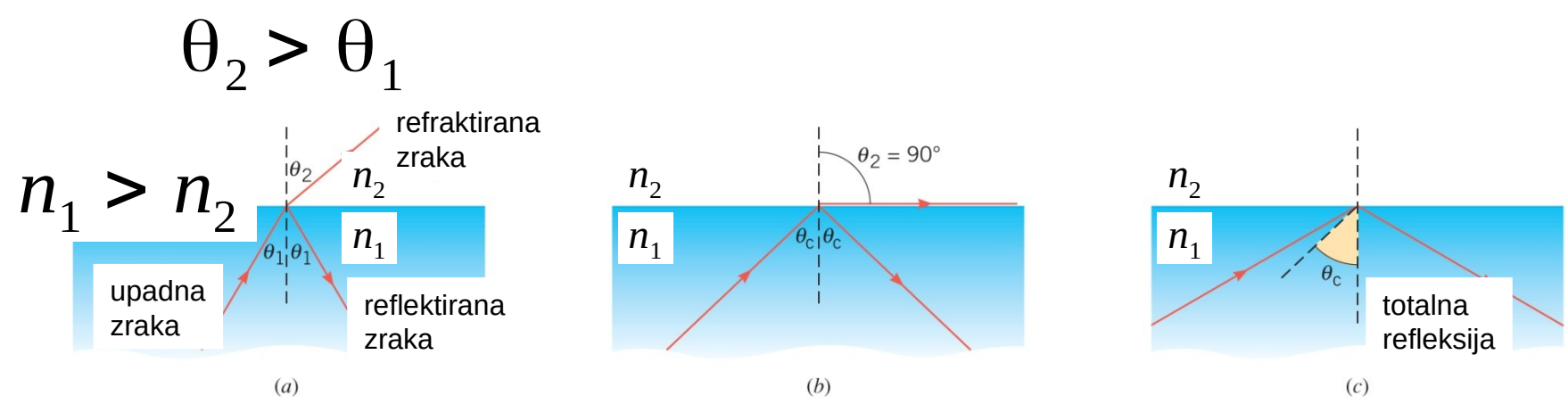


POMAK ZRAKE KOJA PROLAZI KROZ PLANPARALELNU PLOČU



26.3 Totalna refleksija

Kad svjetlost prelazi iz optički gušćeg sredstva (tvari većeg indeksa loma) u optički rjeđe sredstvo (tvar manjeg indeksa loma) onda se lomi od okomice.

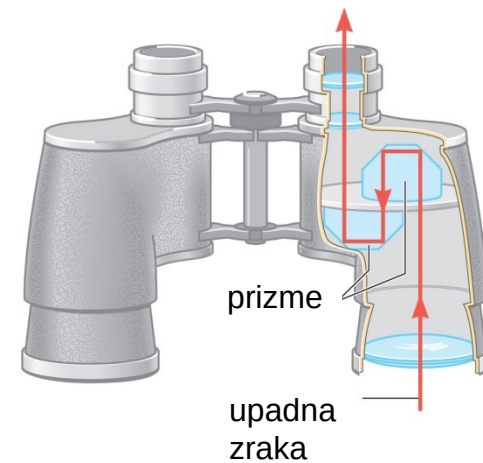
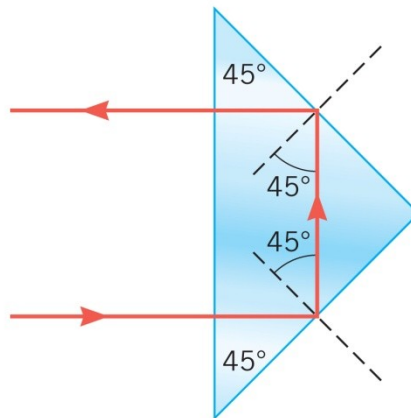
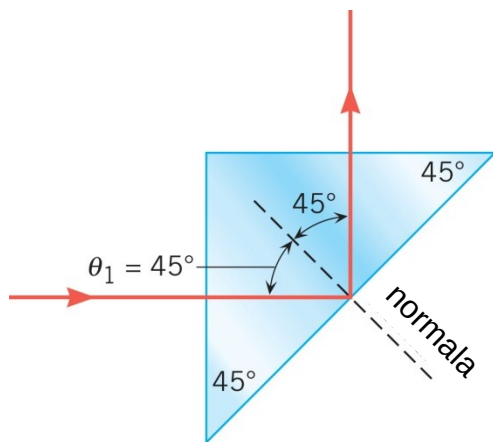


kritični kut

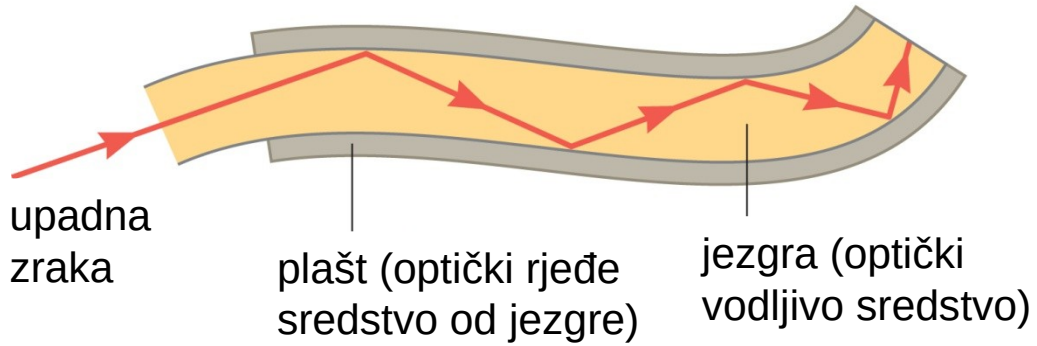
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$n_1 > n_2$

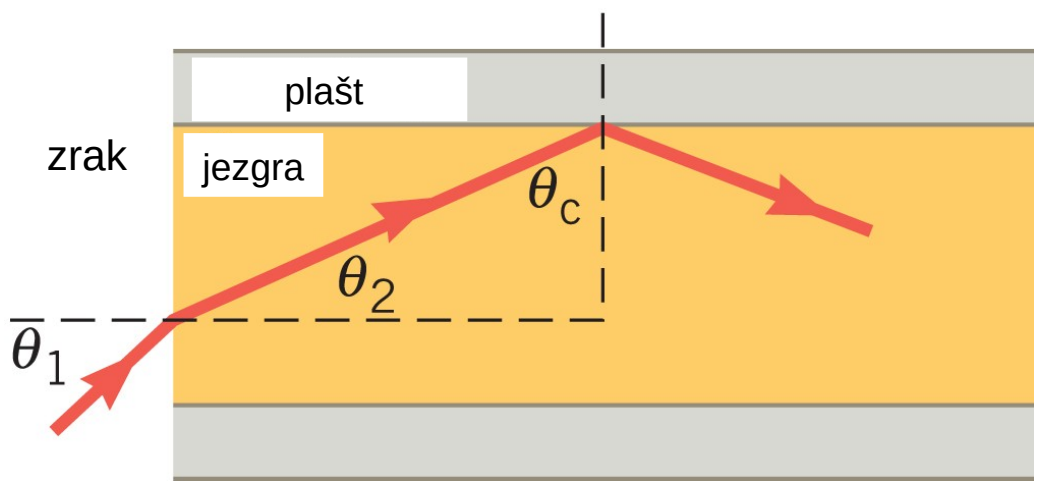
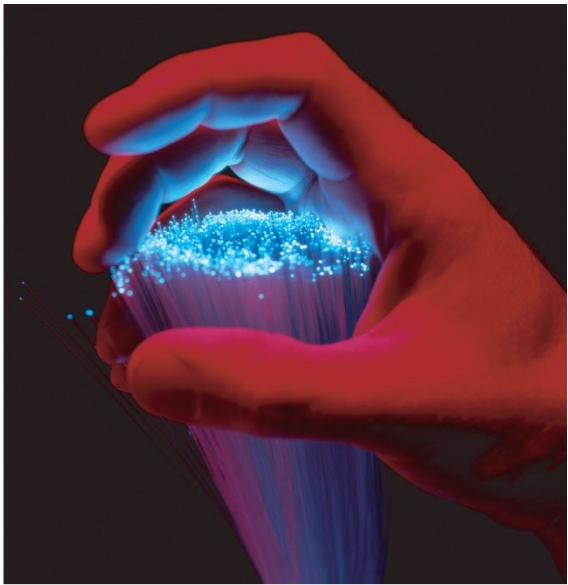
DALEKOZOR



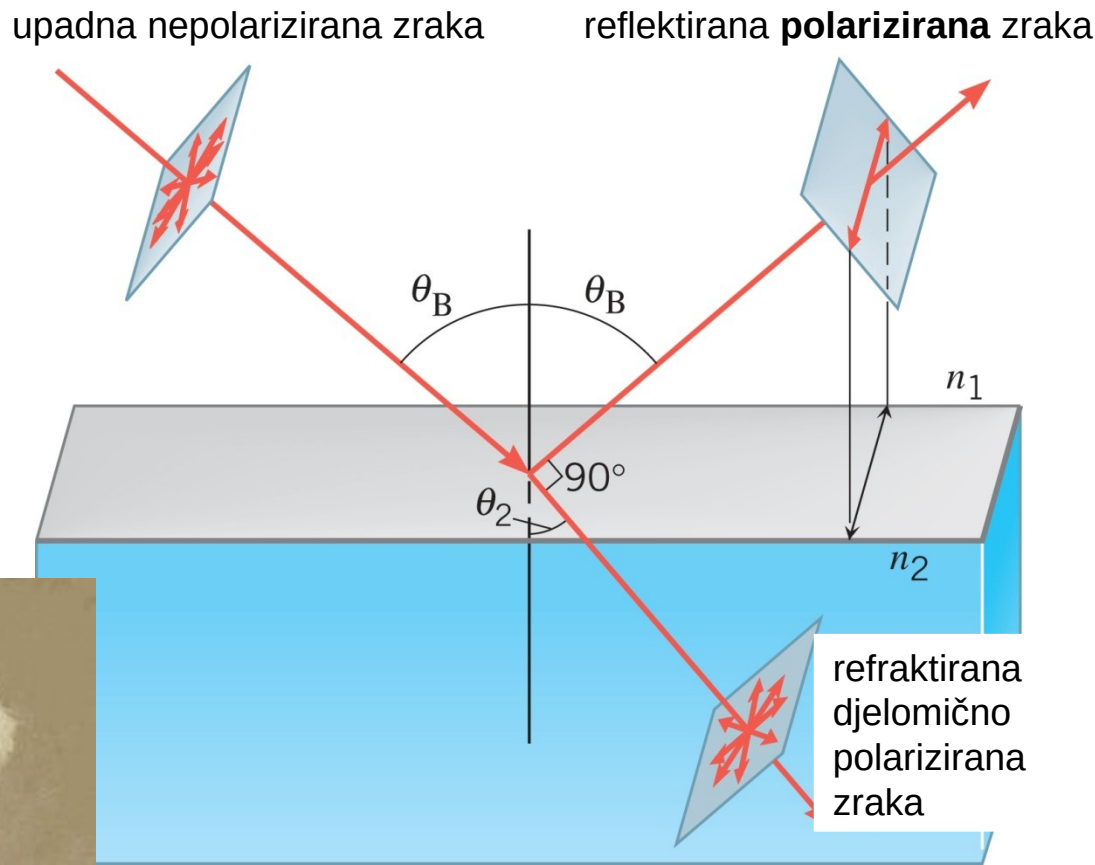
SVJETLOVOD



George Doyle/Getty Images



26.4 Polarizacija, lom i odbijanje svjetlosti



David Brewster (1781. – 1868.)

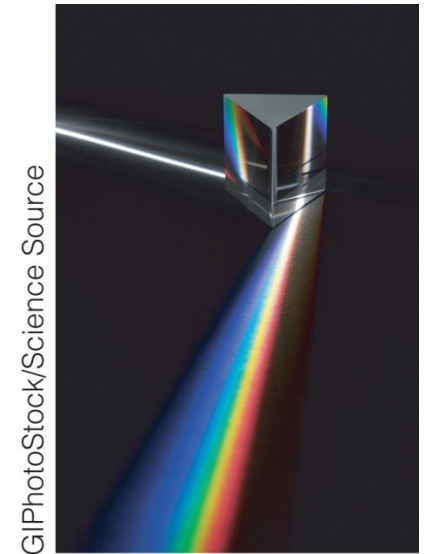
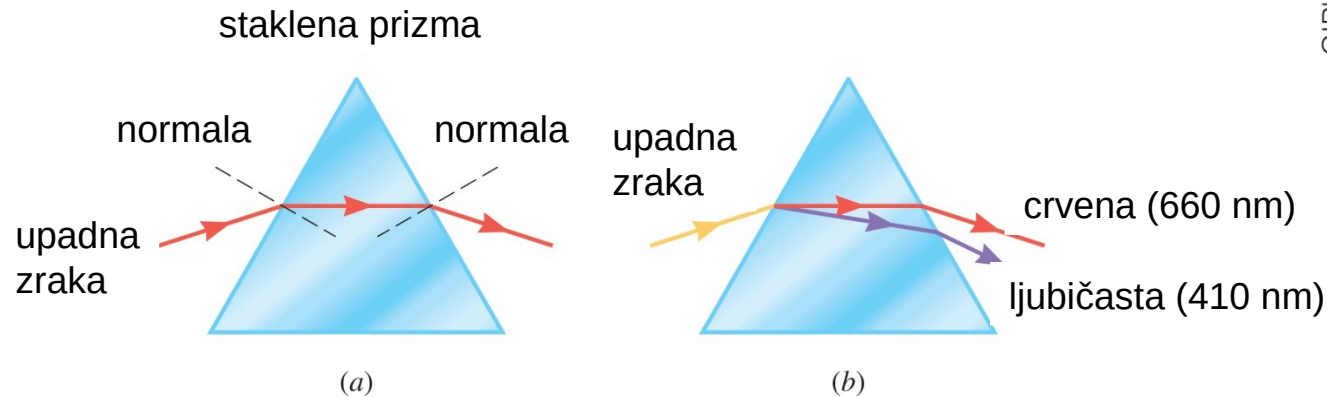
$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Brewsterov zakon}$$

disperzija = rasap



Prizma mijenja smjer zrakama svjetlosti.

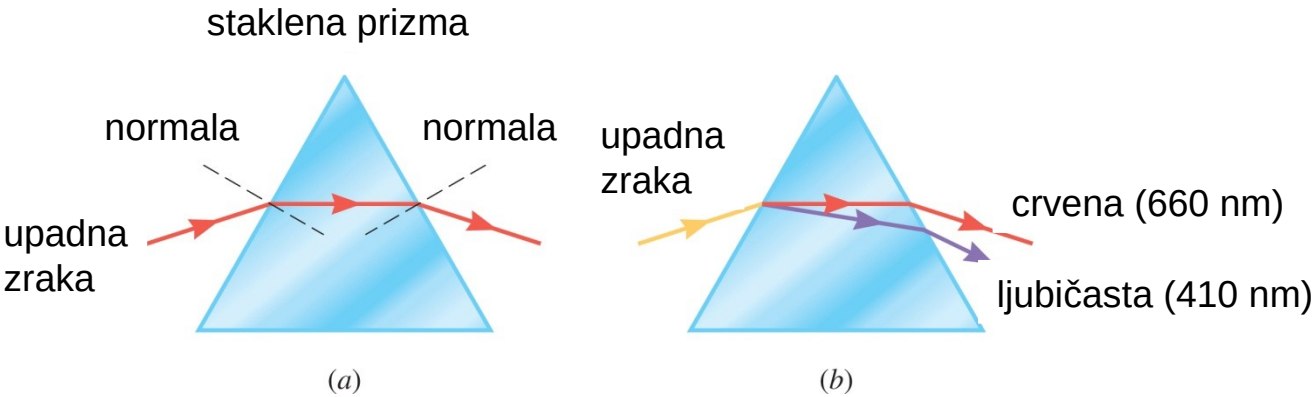
Različite boje otklanjaju se pod različitim kutovima.



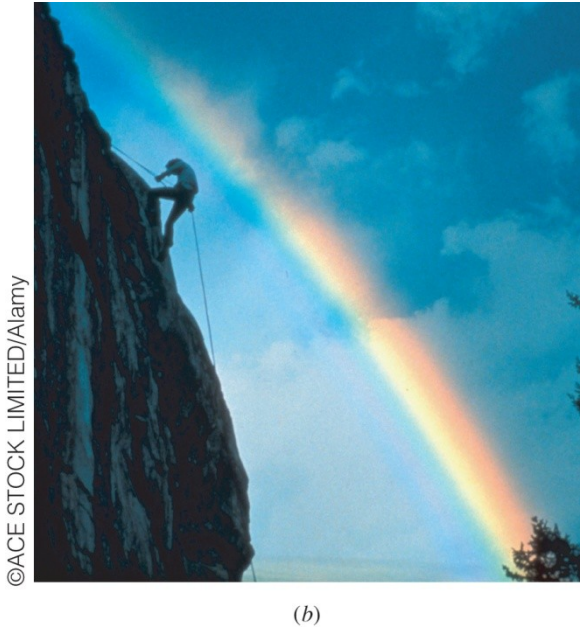
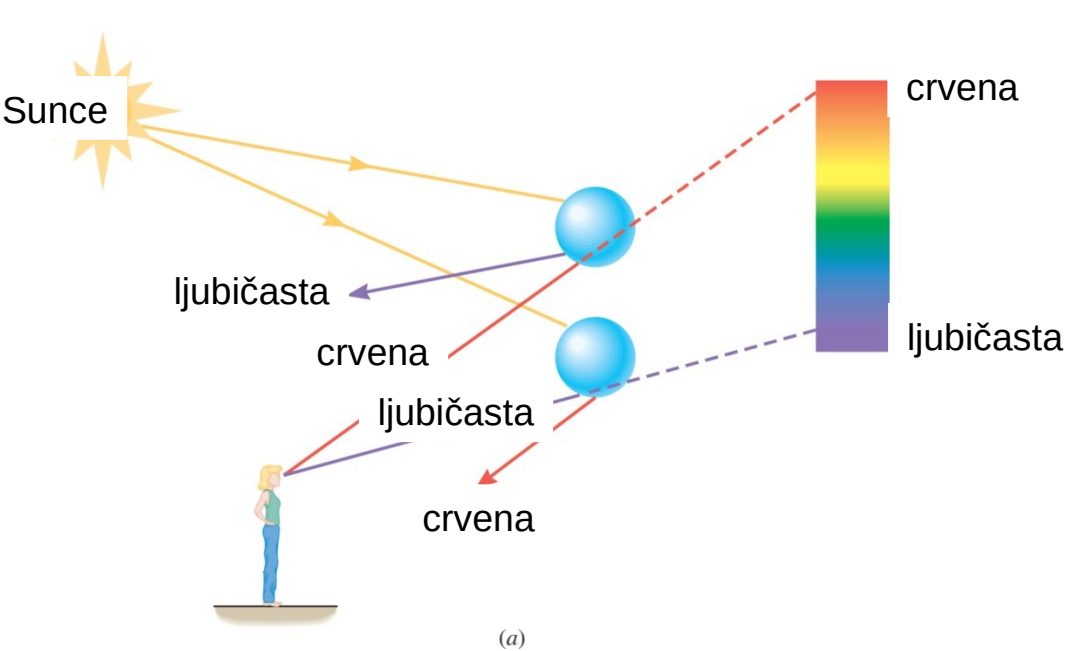
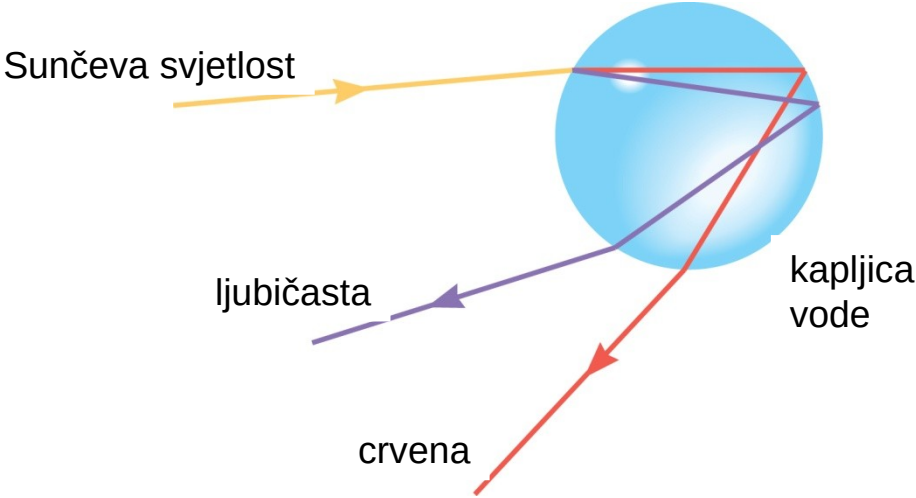
(c)

INDEKS LOMA STAKLA (PO BOJAMA)

boja	valna duljina (nm)	indeks loma
crvena	660	1,520
narančasta	610	1,522
žuta	580	1,523
zelena	550	1,526
plava	470	1,531
ljubičasta	410	1,538



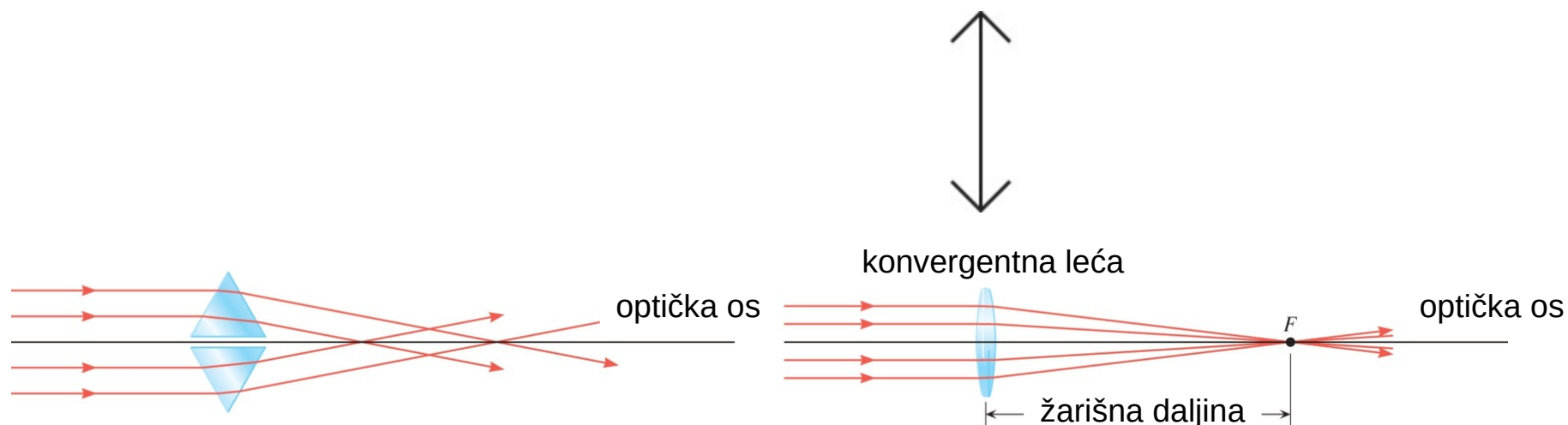
26.5 Disperzija svjetlosti: prizma i duga



WILEY

Leće svjetlost lome tako da stvaraju sliku predmeta.

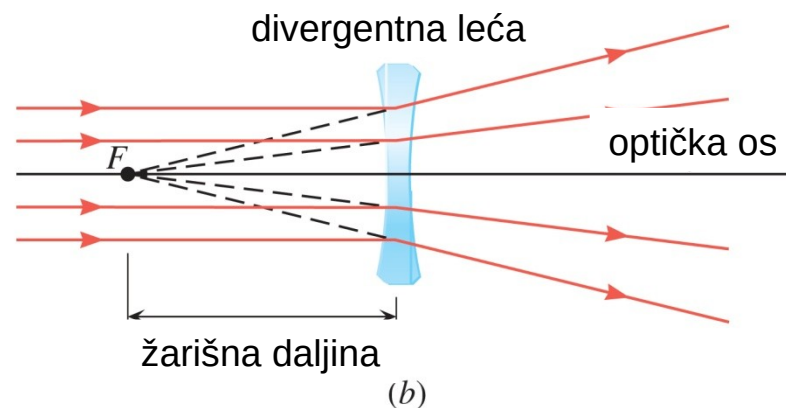
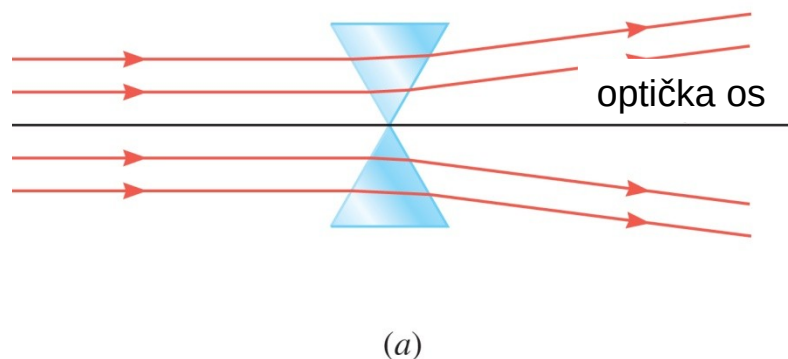
Kod **konvergentne** leće usporedni snop konvergira u jednu točku (žarište).



konvergentna leća = leća sakupljača

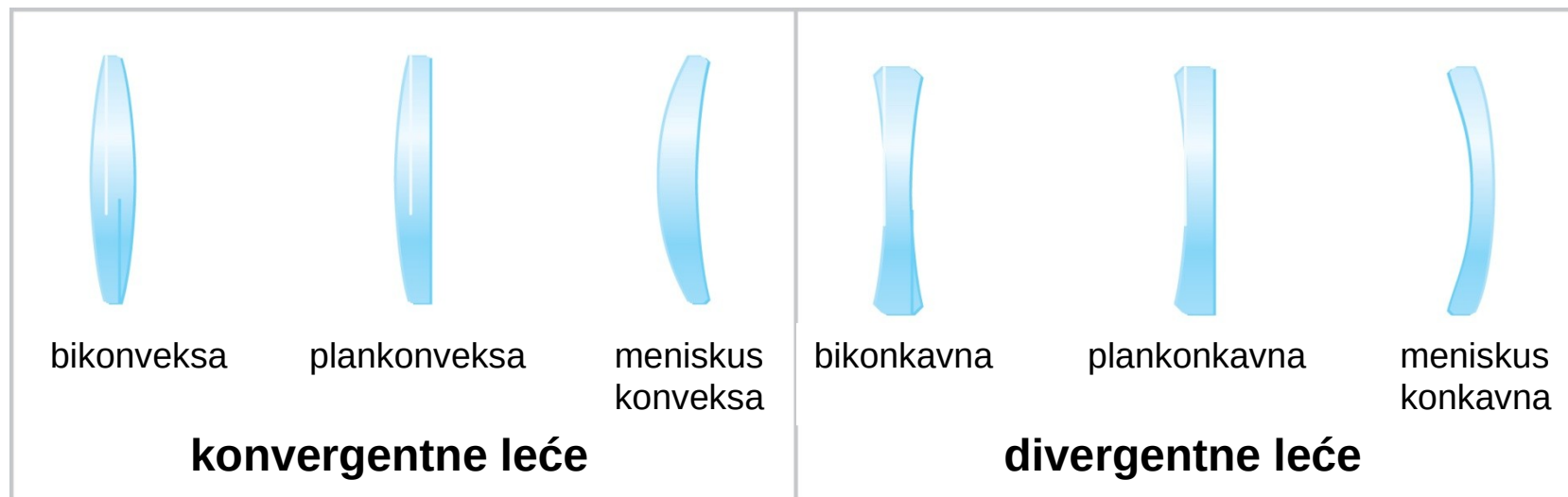


Kod **divergentne** leće usporedni snop divergira, a zamišljeni produžeci refraktiranih zraka sijeku se u jednoj točki (žarištu).



divergentna leća = leća rasipača





Konveksne leće su obično konvergentne, a konkavne su obično divergentne.

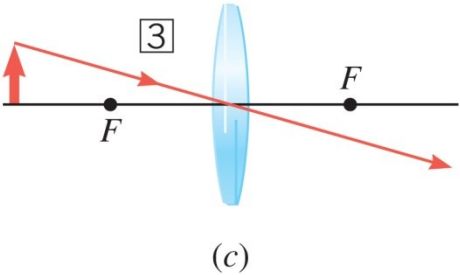
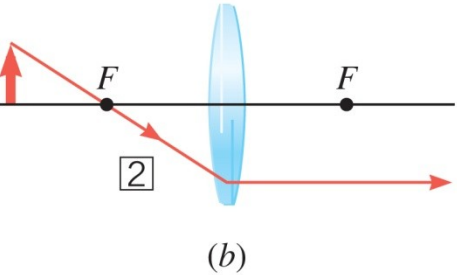
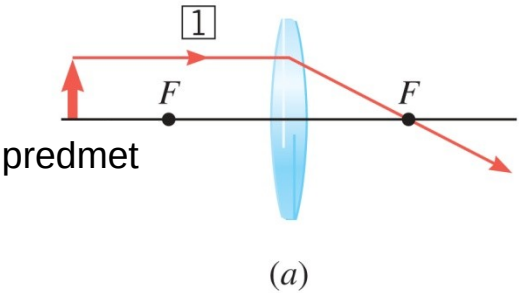
No, to nije uvijek tako!

Utjecaj leće na snop svjetlosti ovisi, osim o obliku leće, i o sredstvu leće i okoline. Zato konveksne leće nisu uvijek konvergentne, niti su konkavne uvijek divergentne.

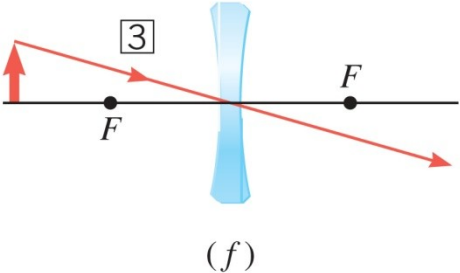
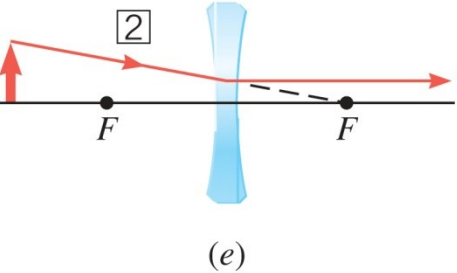
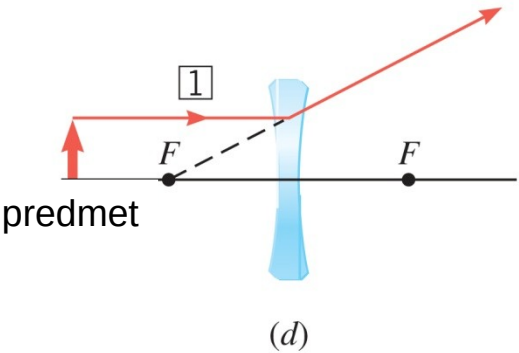


KARAKTERISTIČNE ZRAKE

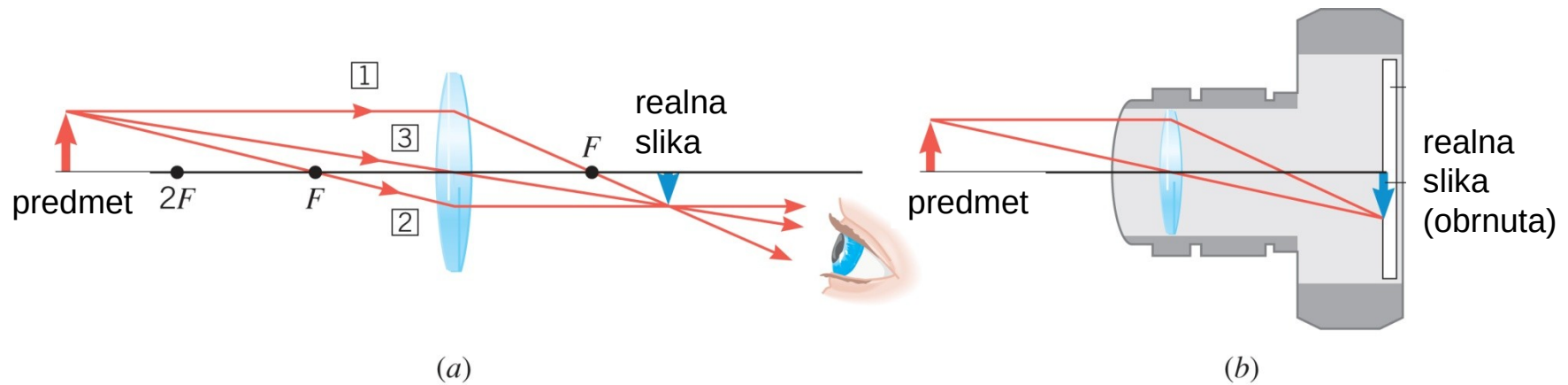
konvergentna leća



divergentna leća

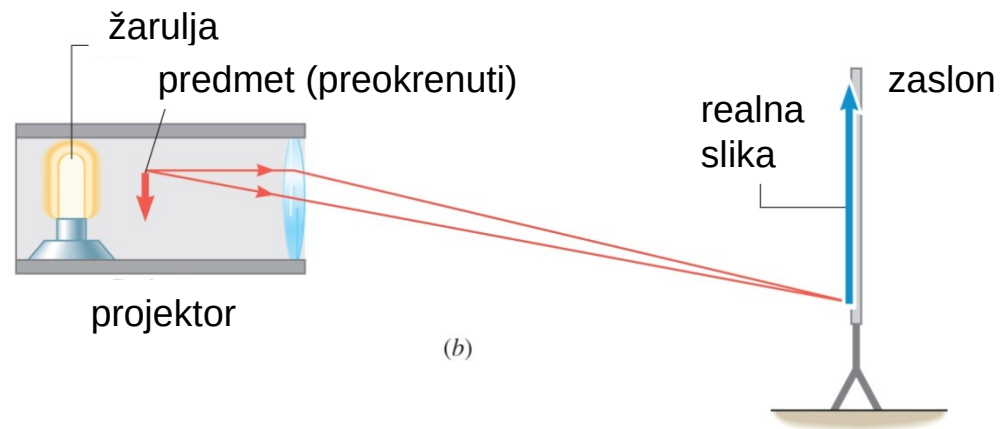
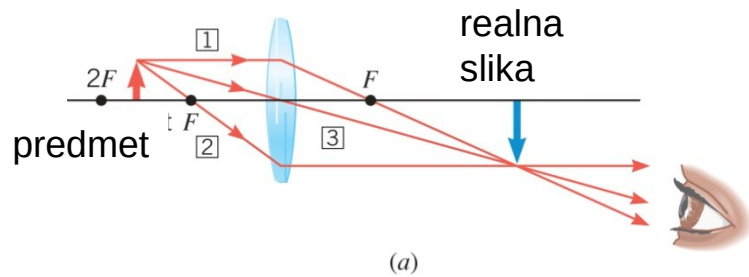


KAKO KONVERGENTNA LEĆA STVARA SLIKU



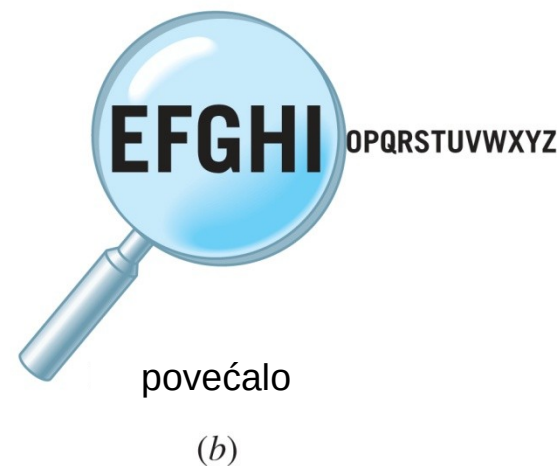
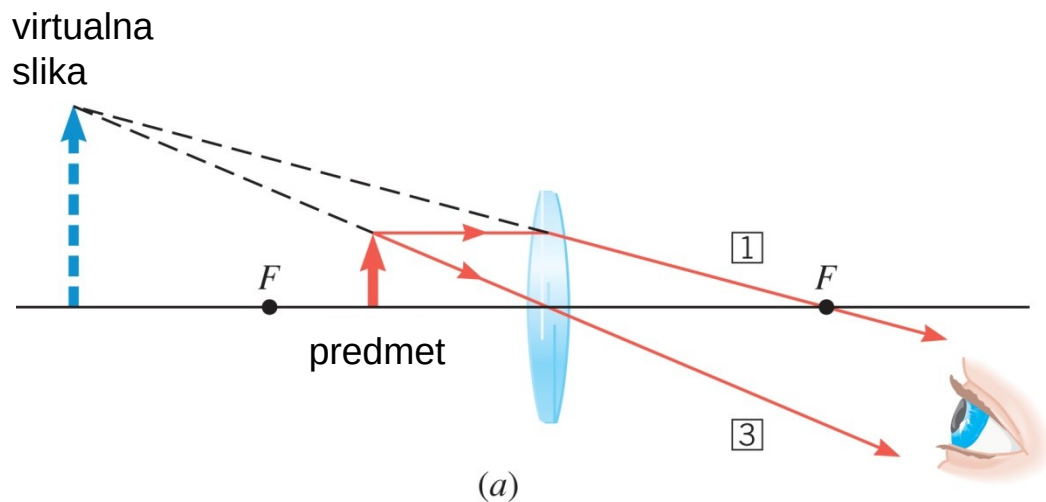
Kad je predmetna udaljenost veća od dvostruke žarišne daljine slika je realna, obrnuta i umanjena.

26.7 Kako leća stvara sliku



Kad je predmetna udaljenost između jedne i dvije žarišne daljine slika je realna, obrnuta i uvećana.

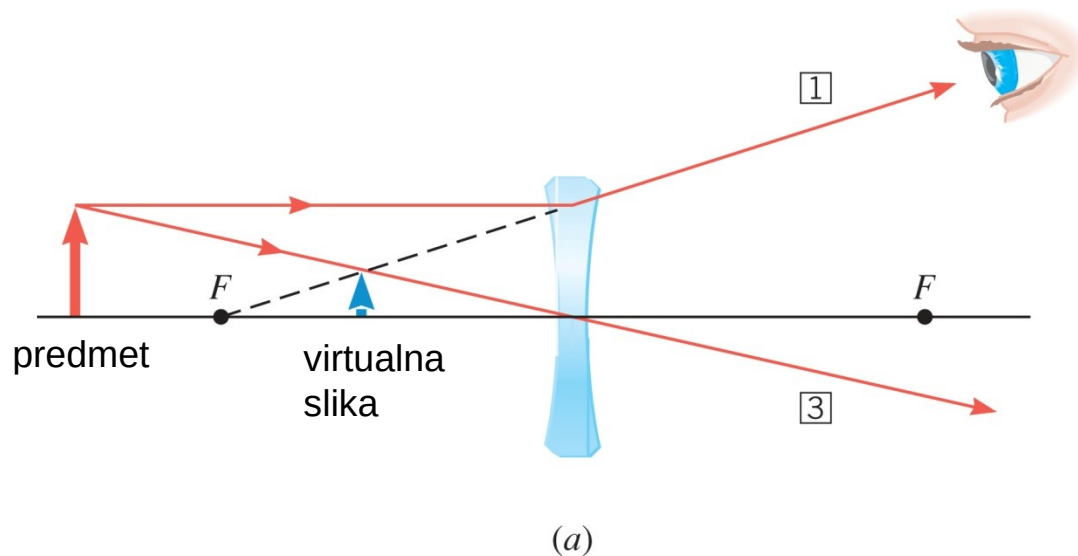
26.7 Kako leća stvara sliku



Kad je predmetna udaljenost manja od žarišne daljine slika je virtualna, uspravna i uvećana.

WILEY

KAKO DIVERGENTNA LEĆA STVARA SLIKU



(a)

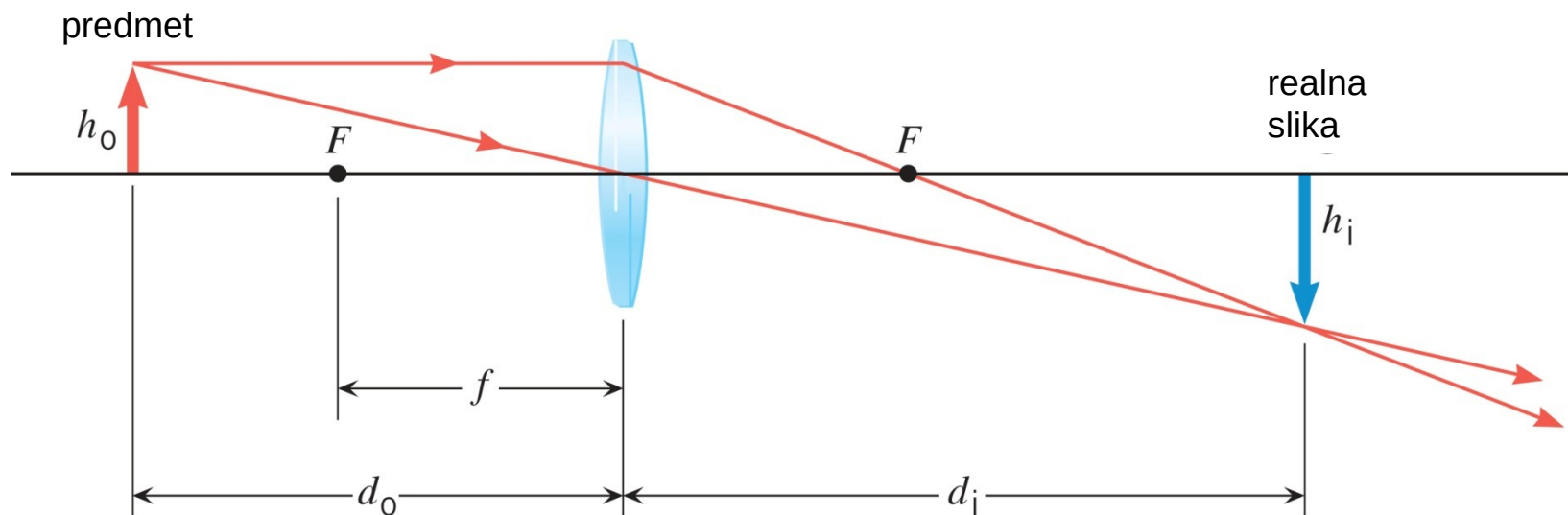


divergentna leća

(b)

Divergentna leća uvijek stvara virtualnu, uspravnu i umanjenu sliku.

26.8 Jednadžba tanke leće i povećanje



$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$$

isto kao za zrcala

WILEY

Konvencija o predznacima za leće

$f > 0$ za konvergentnu leću

$f < 0$ za divergentnu leću

$d_o > 0$ ako je predmet leći slijeva

$d_o < 0$ ako je predmet leći zdesna

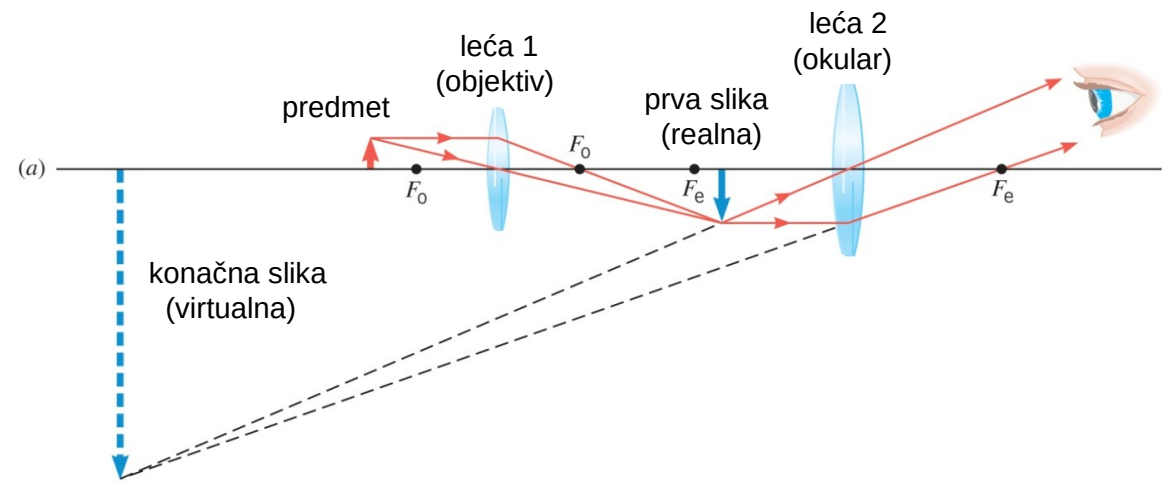
$d_i > 0$ ako je slika leći zdesna (realna)

$d_i < 0$ ako je slika leći slijeva (virtualna)

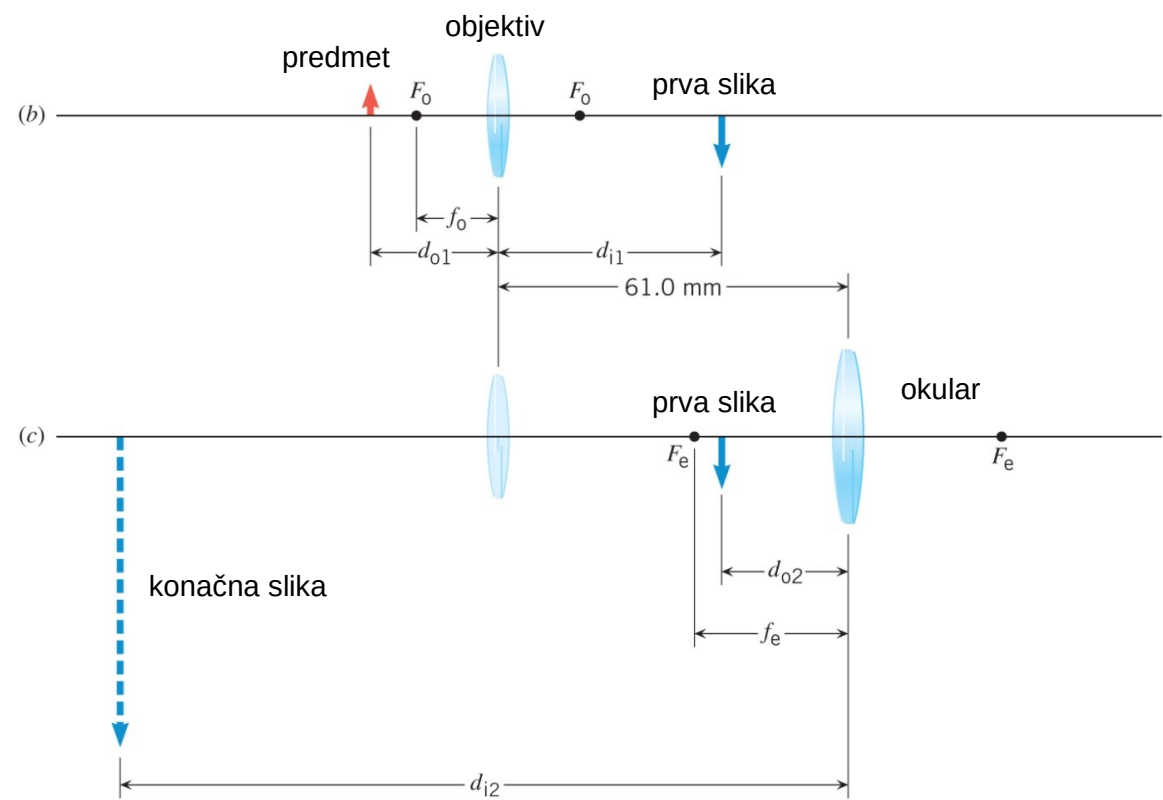
$m > 0$ ako je slika uspravna

$m < 0$ ako je slika obrnuta

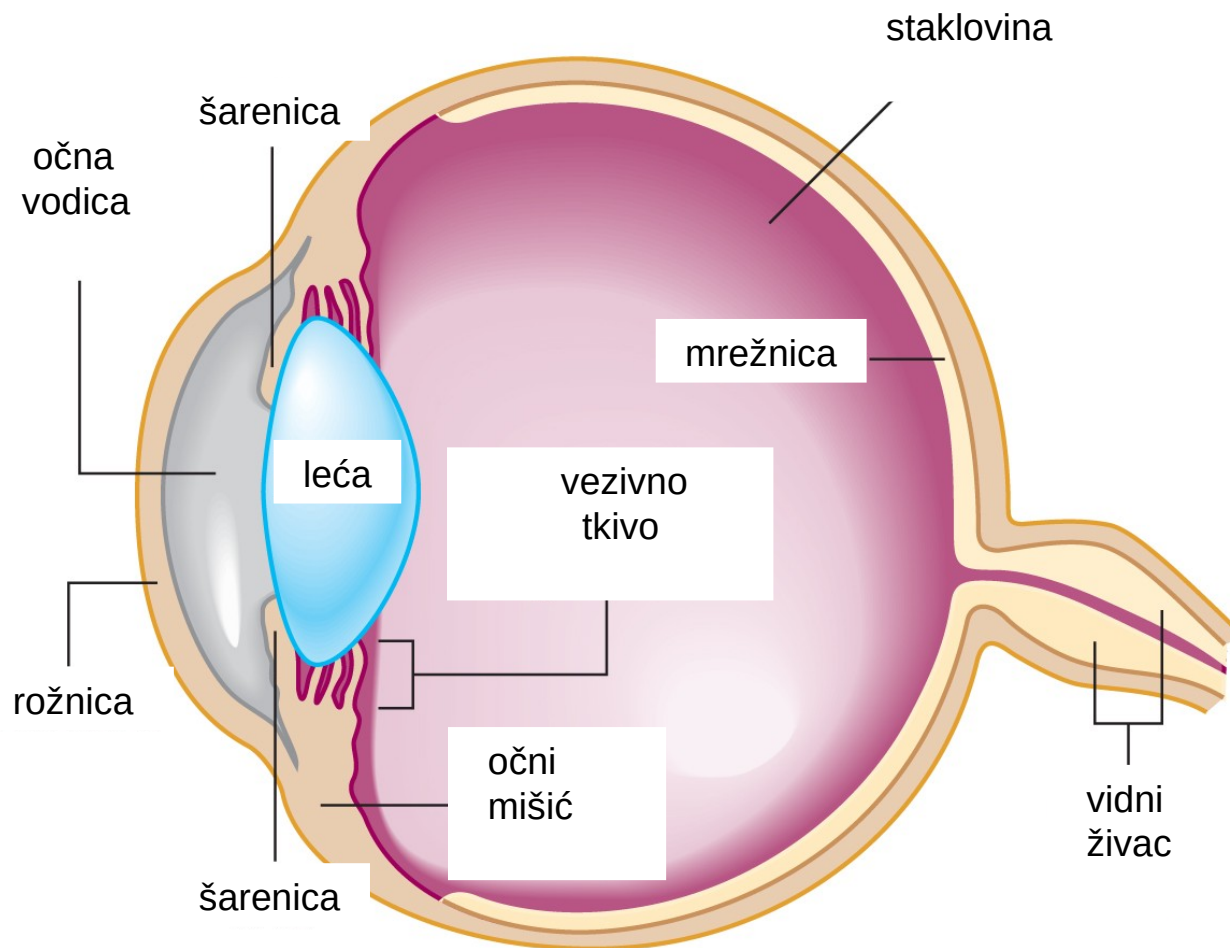
26.9 Kombinacija leća



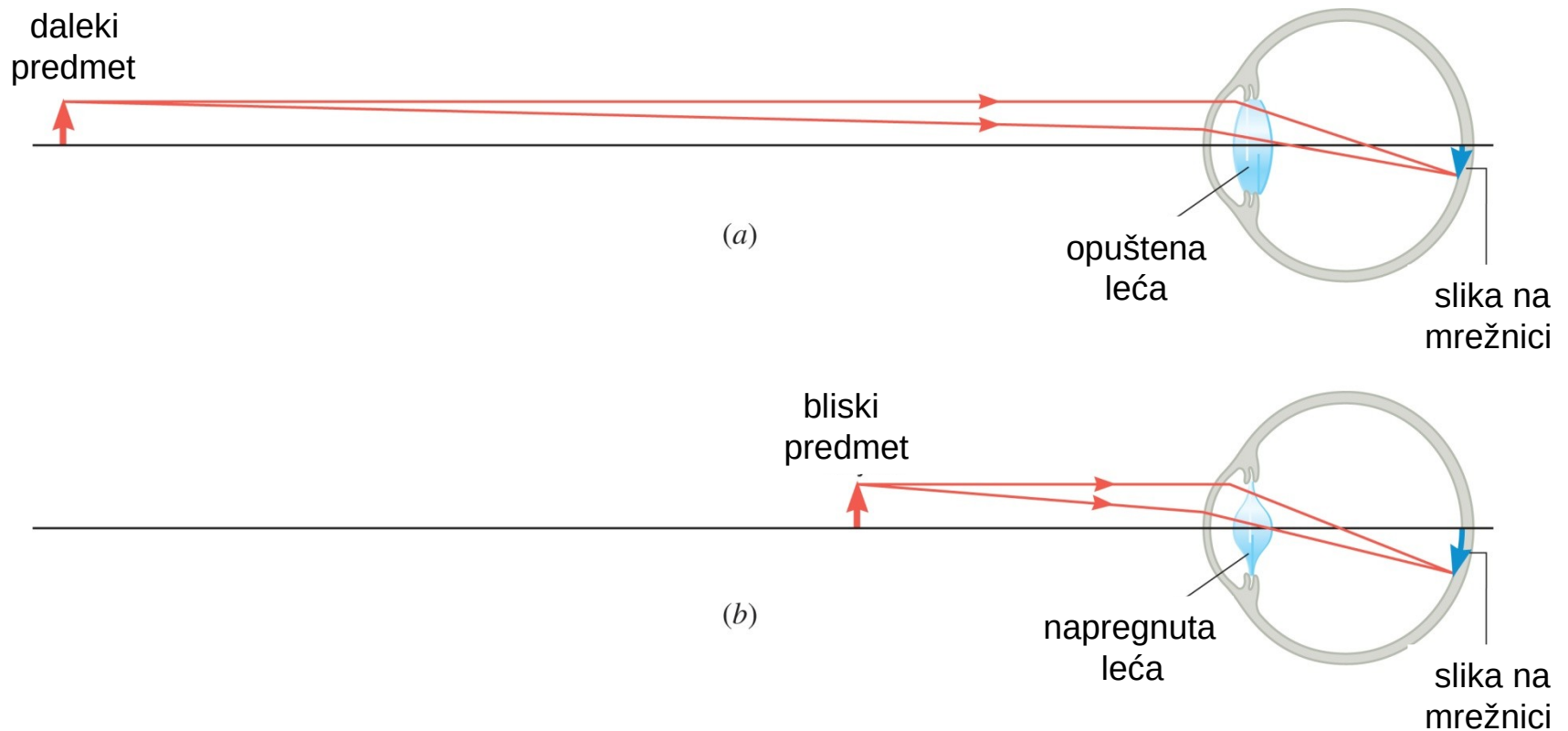
Slika prve leće
djeluje kao predmet
za drugu leću.



ANATOMIJA

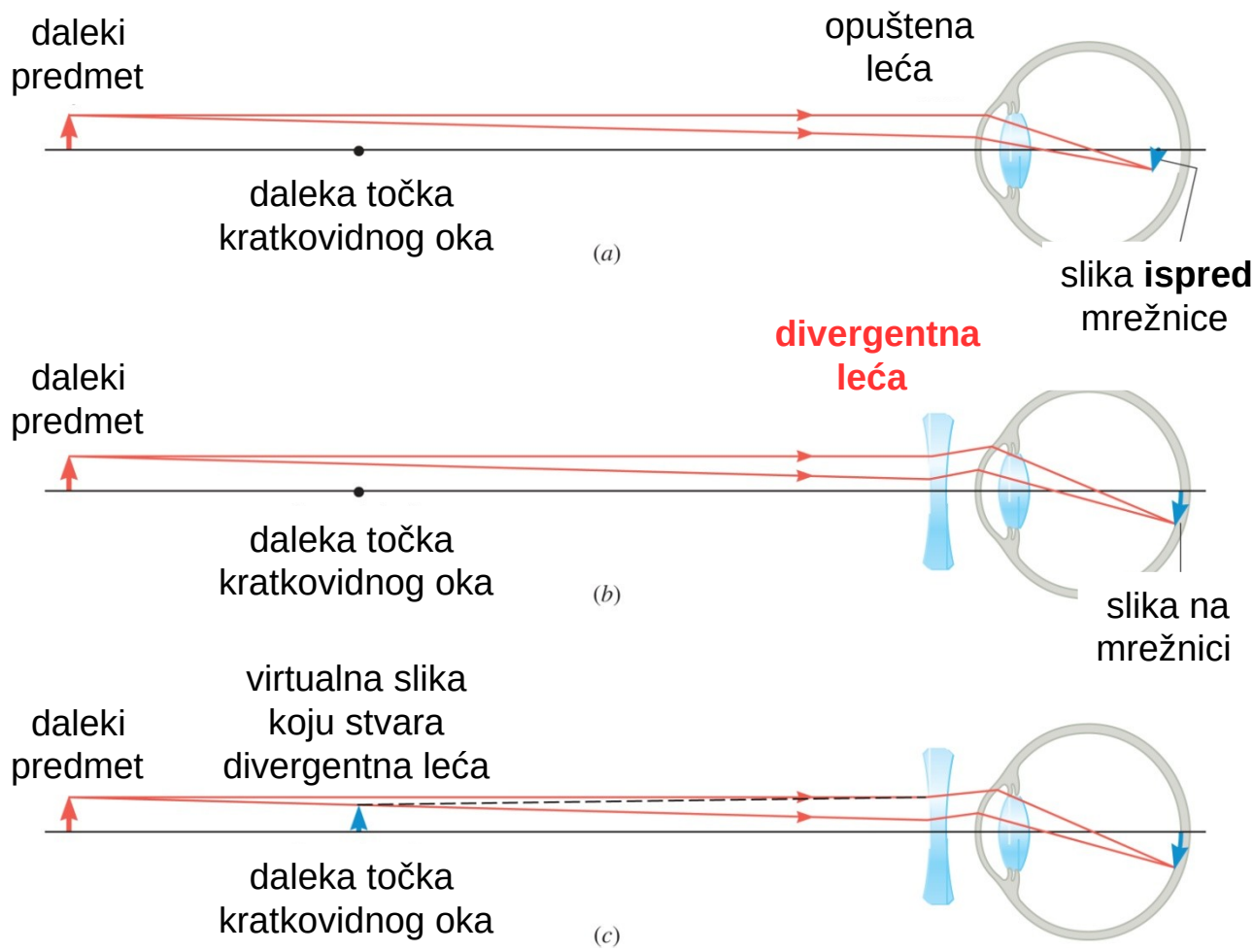


OPTIKA



Očna leća ukupnom lomu svjetlosti u oku doprinosi samo 20 do 25%, no njezina je uloga ključna.

KRATKOVIDNOST



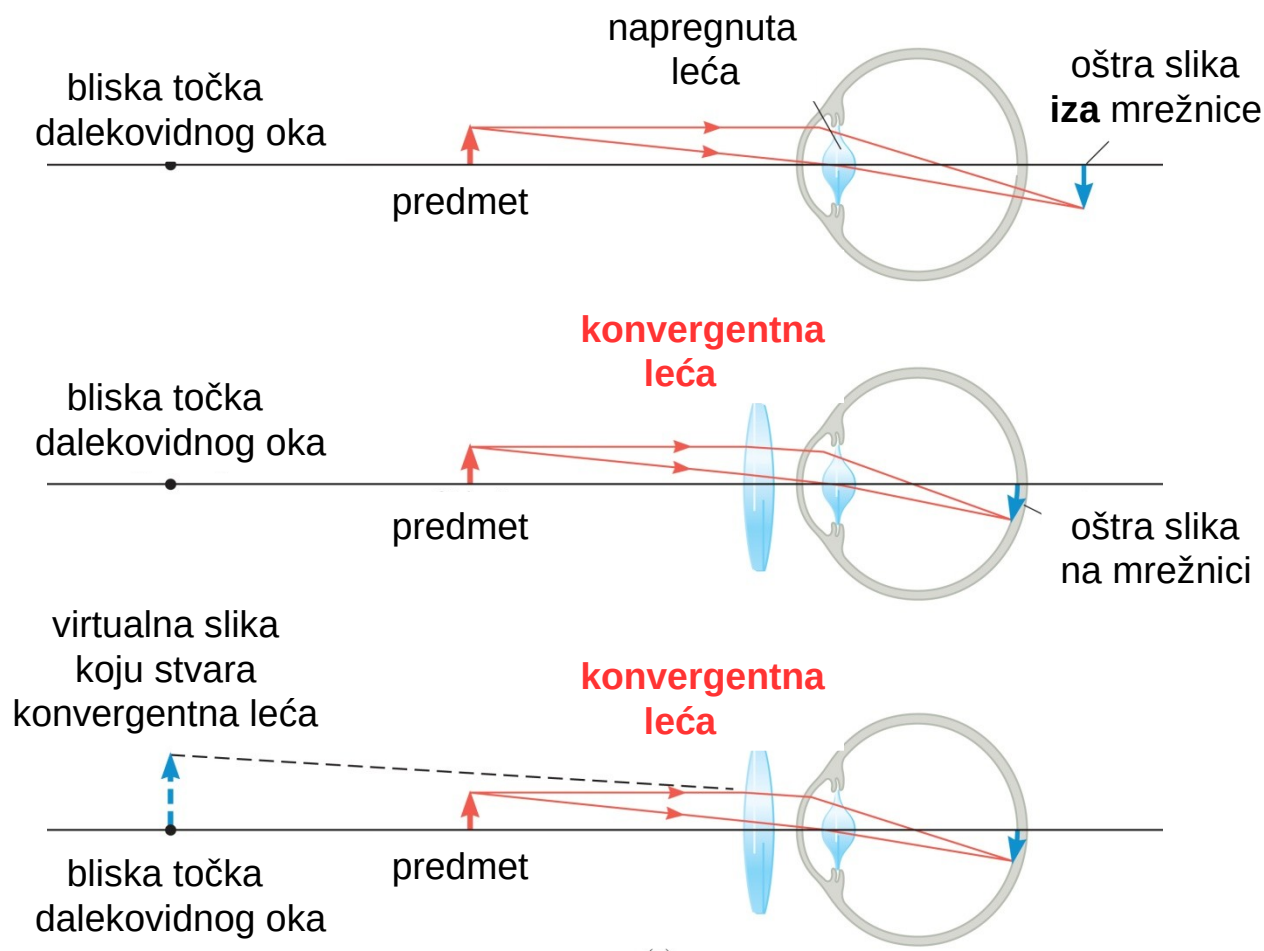
dioptrijska
MINUS

$f < 0$

$D < 0$

Leća stvara sliku udaljenog predmeta u **dalekoj točki** (punctum remotum) kratkovidnog oka. Punctum remotum normalnog oka je u beskonačnosti.

DALEKOVIDNOST



dioptriya
PLUS
 $f > 0$
 $D > 0$

Leća stvara sliku bliskog predmeta u **bliskoj točki** (punctum proximum) dalekovidnog oka. Punctum proximum normalnog oka je oko 25 cm. To je daljina jasnog vida.

JAKOST LEĆA – DIOPTRIJA

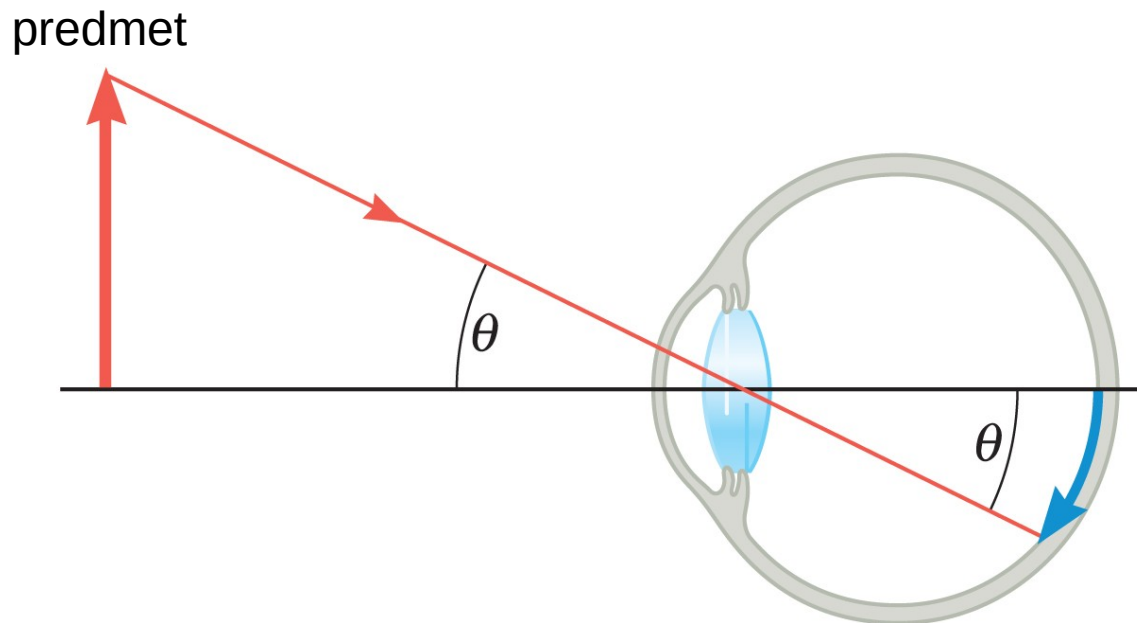
Okulisti, koji prepisuju naočale i kontaktne leće za korekciju vida, i optičari, koji ta pomagala izrađuju, nikad ne navode žarišnu daljinu. Jakost leća opisuju **dioptrijom**:

$$D = \frac{1}{f}$$

$$[D] = \text{m}^{-1}$$

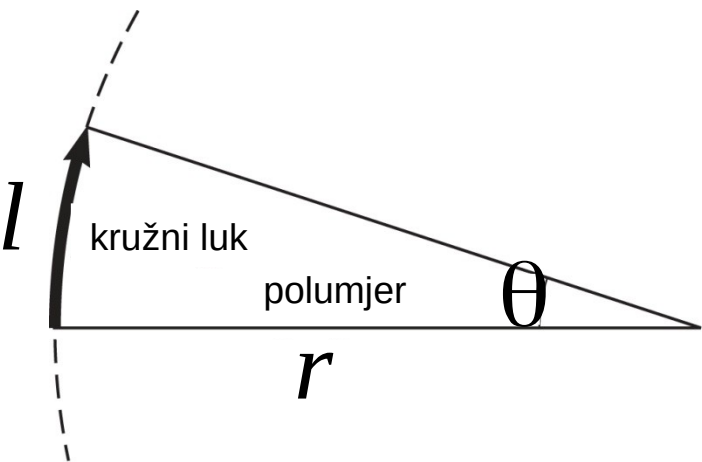
Ako leća ima dioptriju $-2,5$ to znači da je $D = -2,5 \text{ m}^{-1}$ odnosno $f = -0,4 \text{ cm}$. Radi se o divergentnoj leći čiji je iznos žarišne daljine 40 cm .

26.11 Kutno povečanje i povečala



Veličina slike na mrežnici određuje prividnu veličinu predmeta.

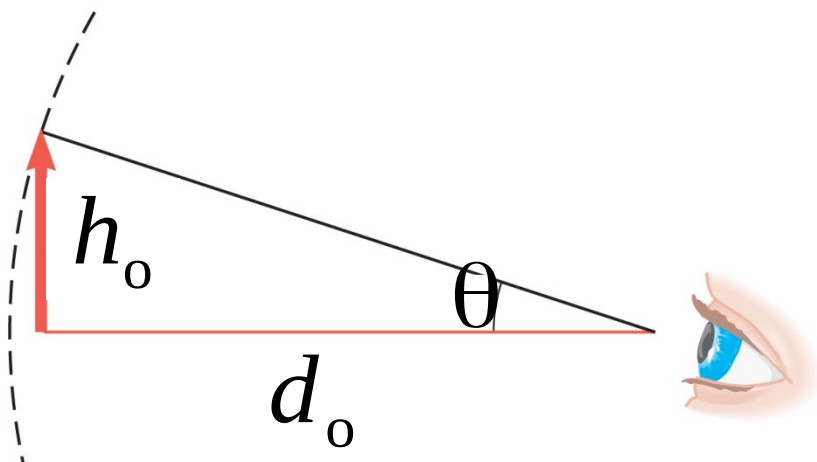
26.11 Kutno povećanje i povećala



(a)

kut u radijanima

$$\theta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{l}{r}$$



(b)

$$\theta \approx \frac{h_o}{d_o}$$

KUTNA VELIČINA

Primjer 14 Kovanica i Mjesec

Usporedite kutnu veličinu kovanice od pet kuna koja se drži na udaljenosti ispružene ruke s kutnom veličinom Mjeseca.

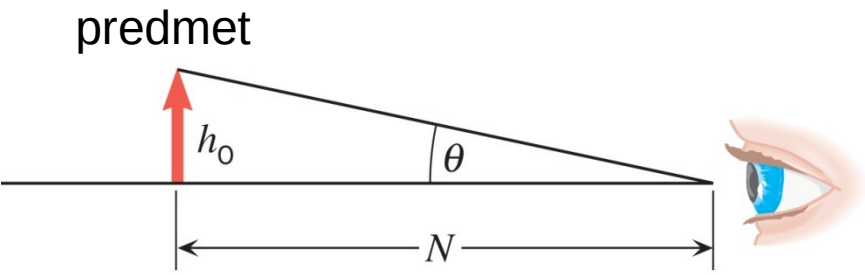
kovanica $\theta \approx \frac{h_o}{d_o} = \frac{2,65 \text{ cm}}{70 \text{ cm}} = 0,04 \text{ rad}$



Mjesec $\theta \approx \frac{h_o}{d_o} = \frac{3,5 \cdot 10^6 \text{ m}}{3,9 \cdot 10^8 \text{ m}} = 0,01 \text{ rad}$



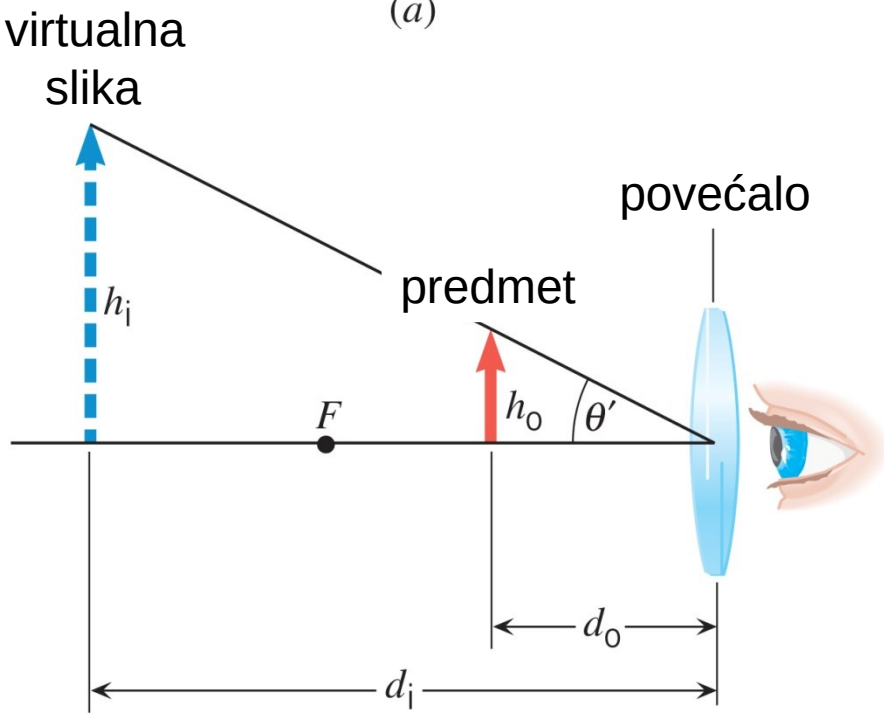
26.11 *Kutno povećanje i povećala*



(a)

kutno povećanje

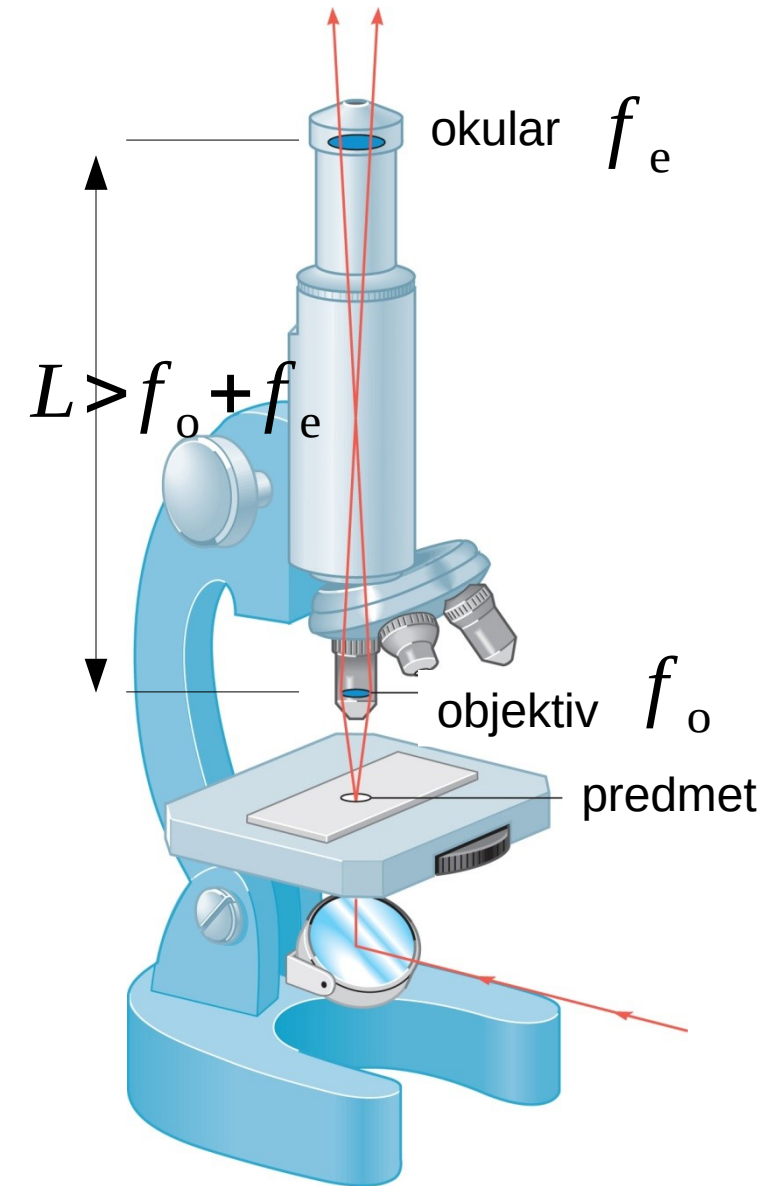
$$M = \frac{\theta'}{\theta}$$



(b)

kutno povećanje povećala

$$M \approx \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} \right) N$$

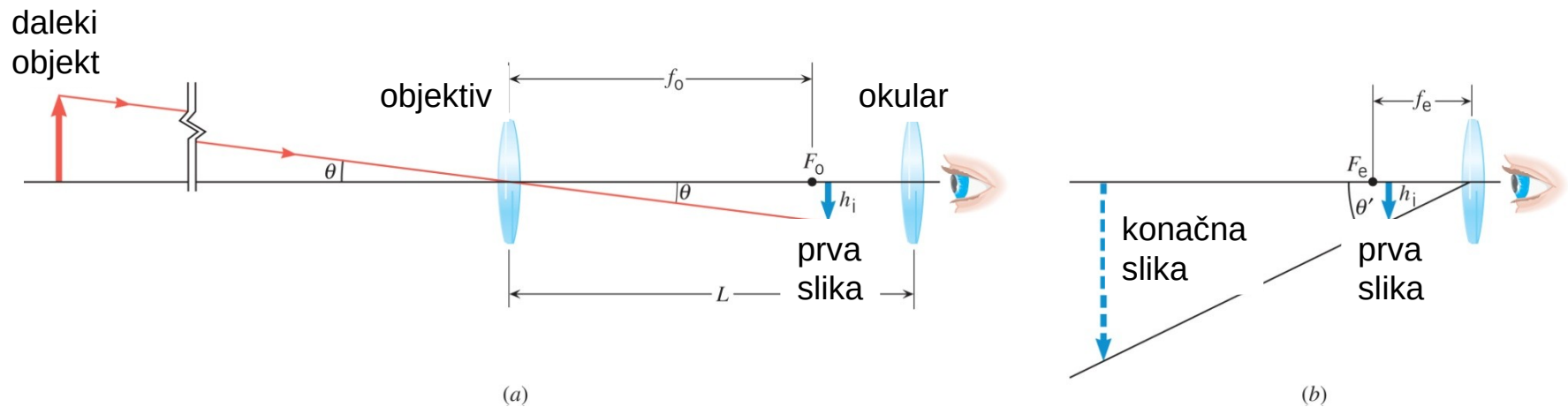


Da bi se uvećalo kutno povećanje povećala, dodaje se još jedna konvergentna leća za "predpovećanje".

kutno povećanje mikroskopa

$$M \approx -\frac{L - f_e}{f_o f_e} N$$

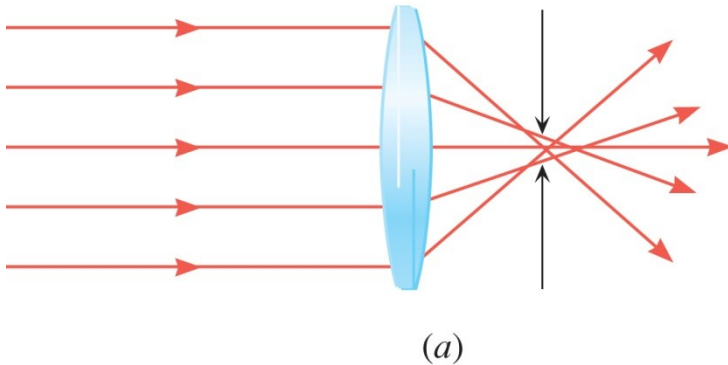
26.13 Teleskop



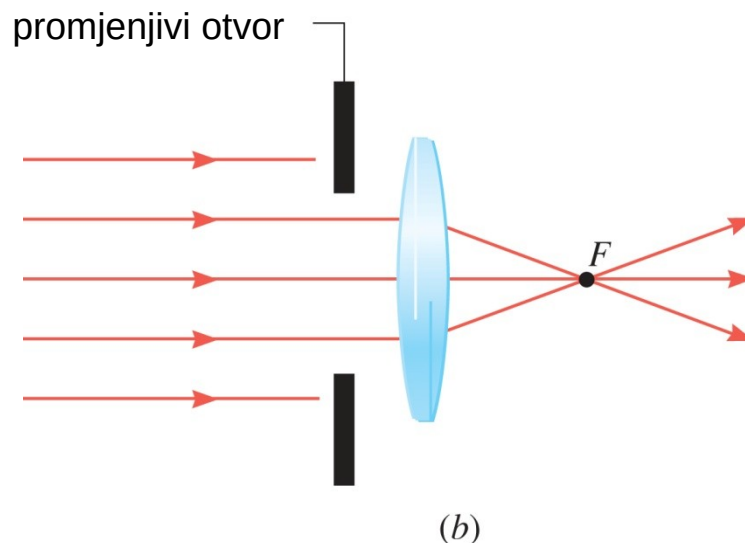
*kutno povećanje
astronomskog teleskopa*

$$M \approx -\frac{f_o}{f_e}$$

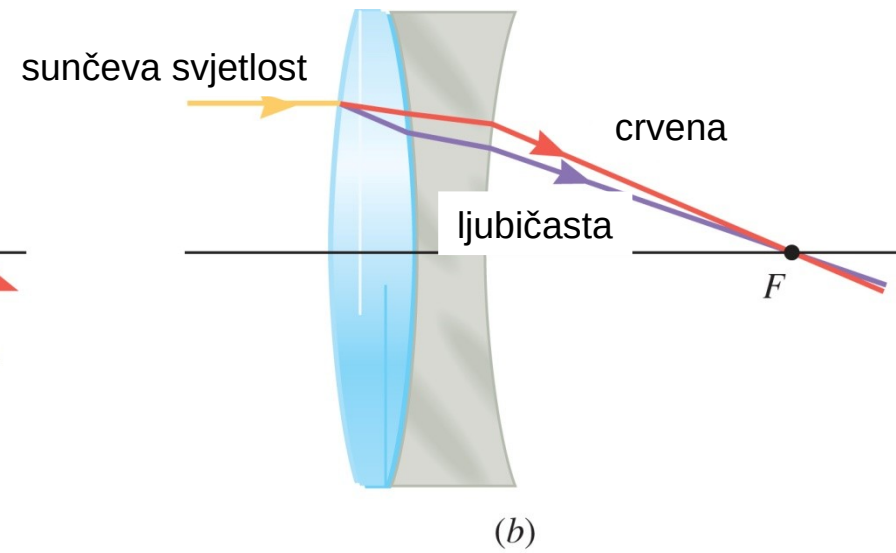
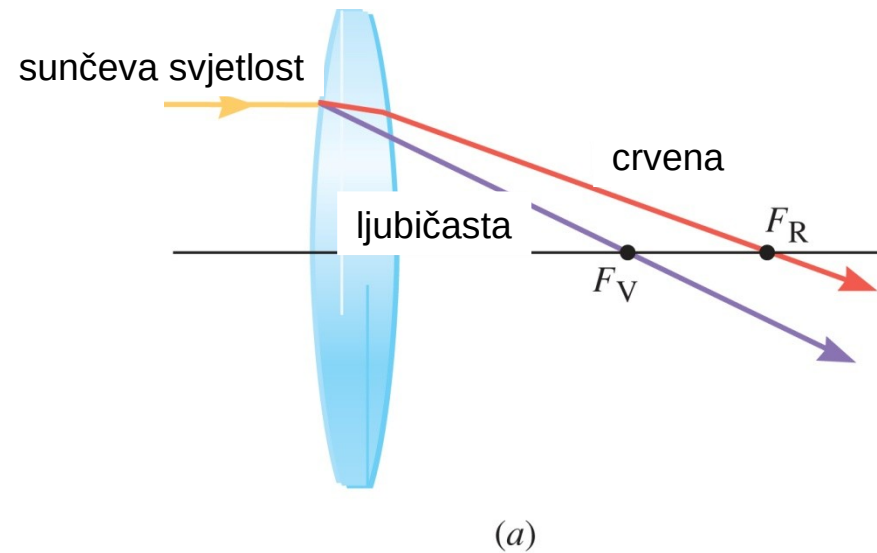
WILEY



Kod konvergentnih leća, sferna aberacija onemogućuje da sve zrake usporednog snopa završe u istoj točki.



Sferna aberacija može se smanjiti korištenjem promjenjivog otvora.



Kromatska aberacija je pojava u kojoj optička leća različite boje fokusira na različita mjesta uzduž optičke osi.

ZADACI ZA VJEŽBU

1. Prozorsko staklo (indeksa loma 1,5) ima debljinu 4,0 mm. Za koliko vremena svjetlost prođe okomito kroz to staklo?

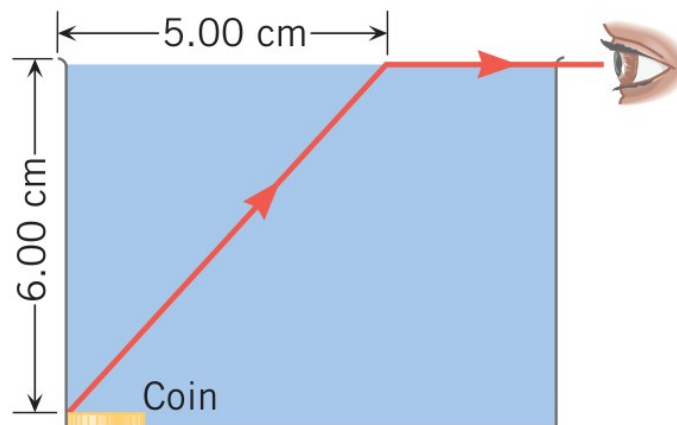
RJEŠENJE: $2,0 \cdot 10^{-11} \text{ s}$

2. Sloj ulja (indeksa loma 1,45) pliva na nepoznatoj tekućini. Svjetlost iz ulja upada u nepoznatu tekućinu pod kutom $64,0^\circ$, a lomi se pod kutom $53,0^\circ$. Odredite indeks loma nepoznate tekućine.

RJEŠENJE: 1,63

3. Crtež prikazuje novčić na dnu posude s nepoznatom tekućinom. Zraka svjetlosti ide od novčića prema površini i lomi se na granici nepoznate tekućine sa zrakom. Opažač tu zraku vidi u ravnini s površinom tekućine. Kolika je brzina svjetlosti u tekućini?

RJEŠENJE: $1,92 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



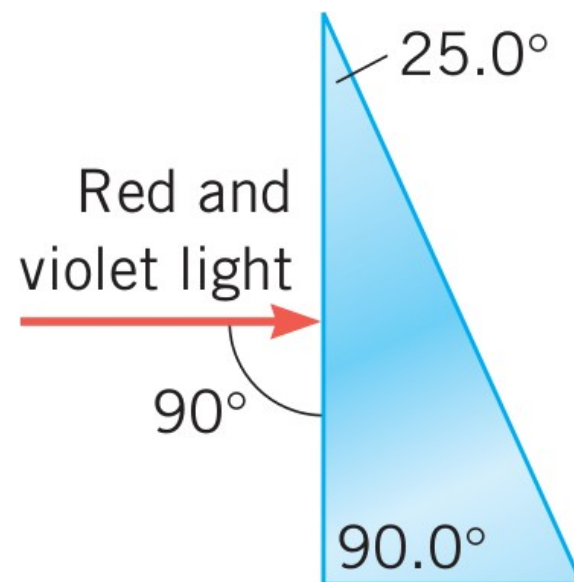
ZADACI ZA VJEŽBU

4. Jantar (indeksa loma 1,546) je transparentna žućkasta fosilna smola. Kukac, koji je uhvaćen i sačuvan u jantaru, nalazi se na prividnoj dubini 2,5 cm ispod površine, gledano okomito odozgo. Na kojoj se stvarnoj dubini kukac nalazi?

RJEŠENJE: 3,9 cm

5. Vodoravne zrake crvene i ljubičaste svjetlosti padaju na prizmu, kao na slici. Indeks loma crvene svjetlosti je 1,662 a ljubičaste 1,698. Oko prizme je zrak. Pod kojim se kutom lome zrake crvene i ljubičaste svjetlosti koje izlaze iz prizme?

RJEŠENJE: 44,6°; 45,9°



ZADACI ZA VJEŽBU

6. Konvergentna leća ima žarišnu daljinu od 88,00 cm. Predmet visok 13,0 cm nalazi se 155,0 cm ispred leće.

(a) Odredite slikovnu udaljenost.

(b) Je li slika realna ili virtualna?

(c) Odredite visinu slike.

RJEŠENJE: 204 cm; realna; -17,1 cm

7. Udaljenost između predmeta i slike koju stvara divergentna leća je 49,0 cm. Žarišna daljina leće je -233,0 cm. Odredite:

(a) slikovnu udaljenost;

(b) predmetnu udaljenost.

RJEŠENJE: -85,1 cm; 134 cm

8. Dvije konvergentne leće udaljene su 24,00 cm. Žarišna daljina svake leće je 12,00 cm. Predmet je smješten 36,00 cm lijevo od lijeve leće. Izračunajte udaljenost konačne slike s obzirom na desnu leću.

RJEŠENJE: -12 cm

ZADACI ZA VJEŽBU

9. Osoba ima daleku točku od 5,0 m za desno oko i 6,5 m za lijevo oko. Napišite joj recept za dioptriju za kontaktne leće.

RJEŠENJE: lijevo oko $-0,15$; desno oko $-0,20$

10. Teleskop ima objektiv jakosti 1,25 dioptrija i okular jakosti 250 dioptrija. Odredite kutno povećanje tog teleskopa.

RJEŠENJE: -200



PITANJA ZA PONAVLJANJE

1. Indeks loma
2. Snellov zakon loma
3. Totalna refleksija
4. Disperzija svjetlosti
5. Duga
6. Optička leća
7. Konstrukcija slike konvergentne leće
8. Konstrukcija slike divergentne leće
9. Optički instrumenti
10. Sferna i kromatska aberacija