



FIZIKA SI

Časovi 17-20

Optika

Arsoski Vladimir

NANO•OPTO•BIO

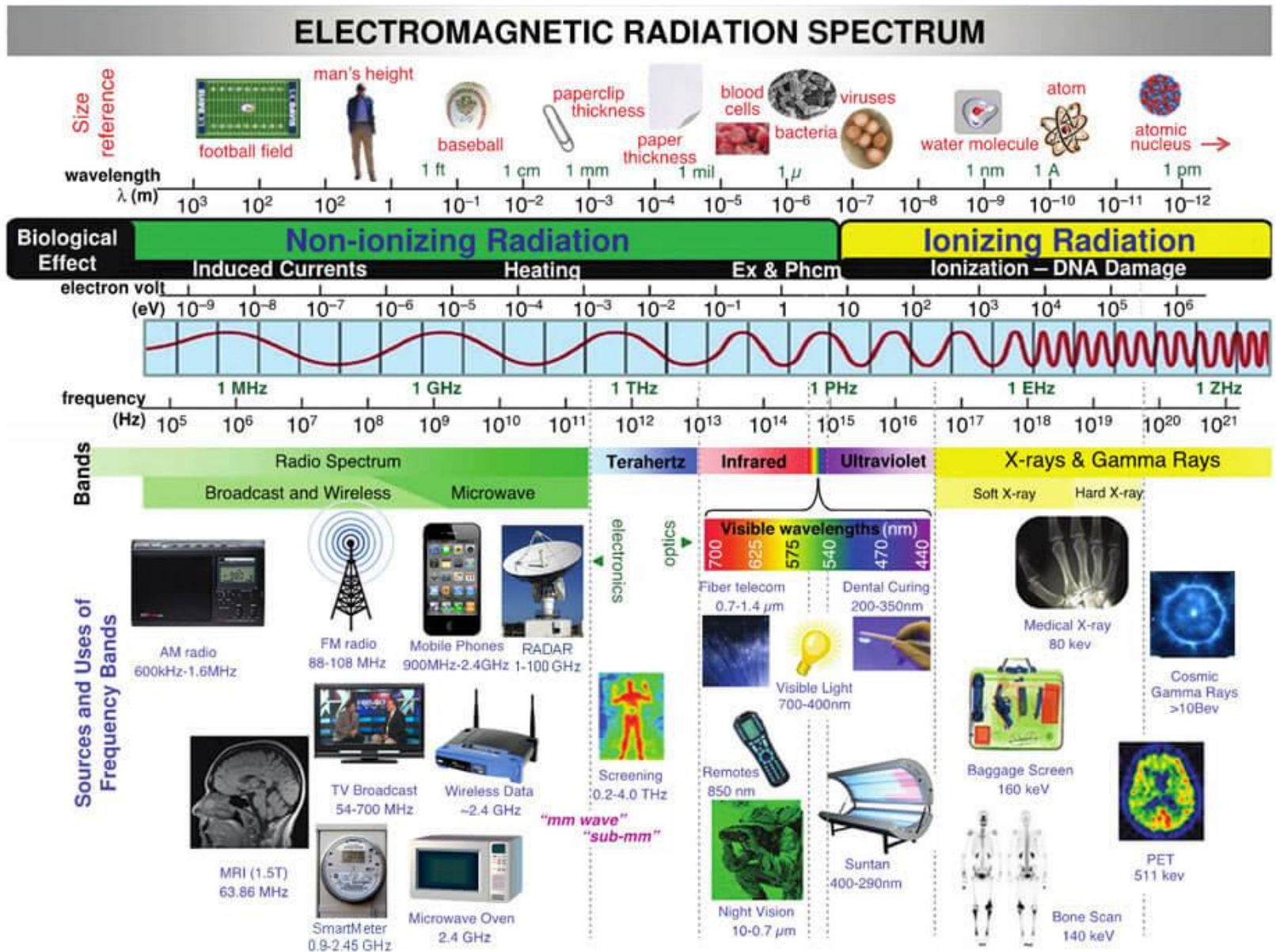
NOBEL
elektronika

odsek za fizičku elektroniku

LASERSKA TEHNIKA

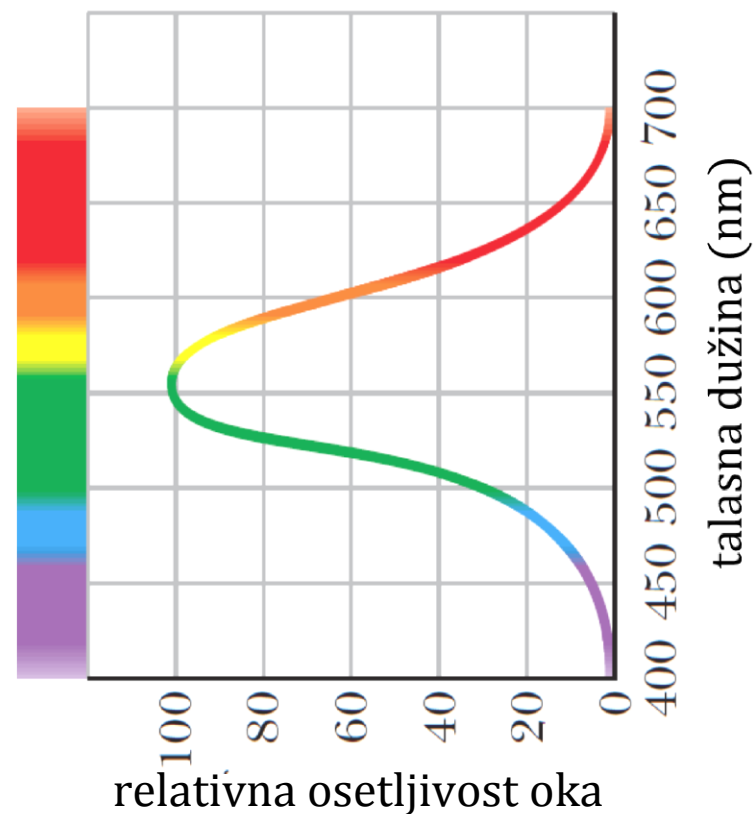
<http://nobel.etf.bg.ac.yu/>

Spektar elektromagnetskog zračenja

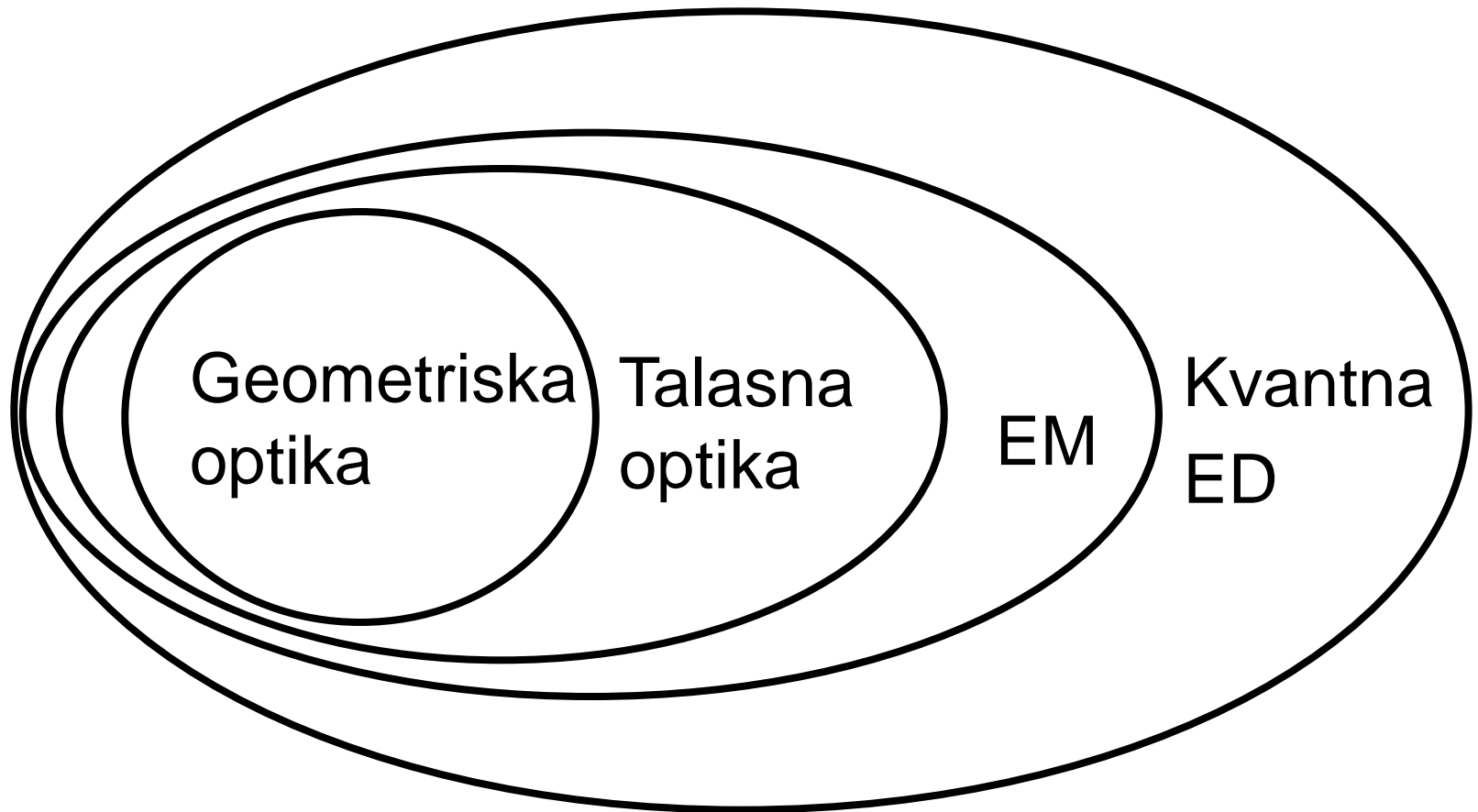


Vidljiva svetlost je mali deo EM spektra

Boja	λ [nm]	ν [THz]
Crvena	780-622	384-482
Oranž	622-597	482-503
Žuta	597-577	503-520
Zelena	577-492	520-610
Plava	492-455	610-659
Ljubičasta	455-390	659-769



Hijerarhija teorijskih pristupa





Elektromagnetika

Opšte o elektromagnetskim talasima ($c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$)

- 1) Naelektrisanje je izvor električnog polja.
- 2) Naelektrisanje u pokretu generiše magnetsko polje.

Daleko od izvora zračenja \approx ravanski talas ...

Jednačine za električno polje i magnetsku indukciju ravnanskog EM talasa koji se prostire duž x – ose:

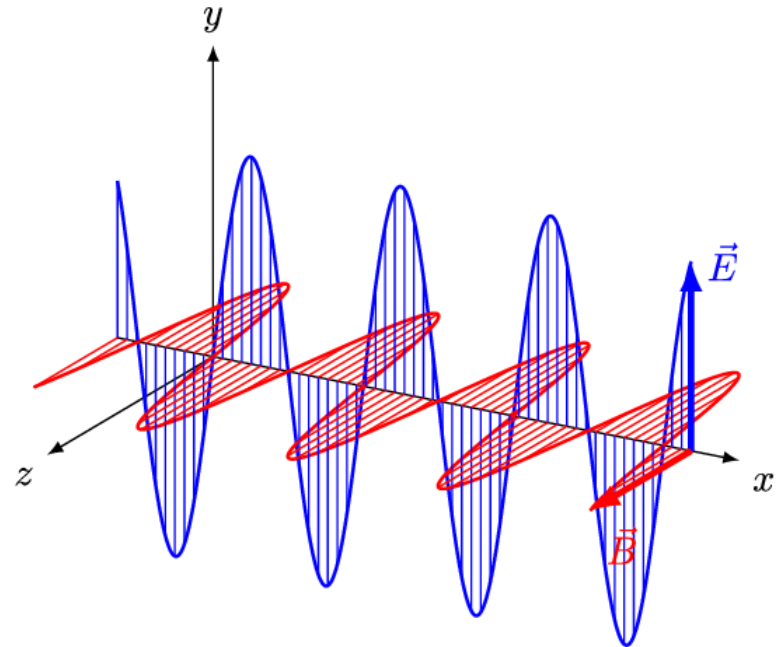
$$\begin{aligned} E &= E_m \sin(\omega t - kx), \\ B &= B_m \sin(\omega t - kx), \end{aligned}$$

gde su \vec{E} i \vec{B} normalni na pravac prostiranja talasa, a \vec{k} je u smeru x – ose. Odnos magnituda je:

$$\frac{E}{B} = \frac{E_m}{B_m} = c,$$

gde je brzina prostiranja EM talasa:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c_0}{n}, \quad \text{gde je } \varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r, \mu = \mu_0\mu_r, c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \text{ – brzina u vakuumu.}$$



Poyntingov vektor i iradijansa

Snaga koja se izrači kroz jedinicu površine data je Poyntingovim vektorom:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B},$$

gde su \vec{E} i \vec{B} ortogonalni te je:

$$S = \frac{EB}{\mu} = \frac{E^2}{c\mu} = \epsilon c E^2.$$

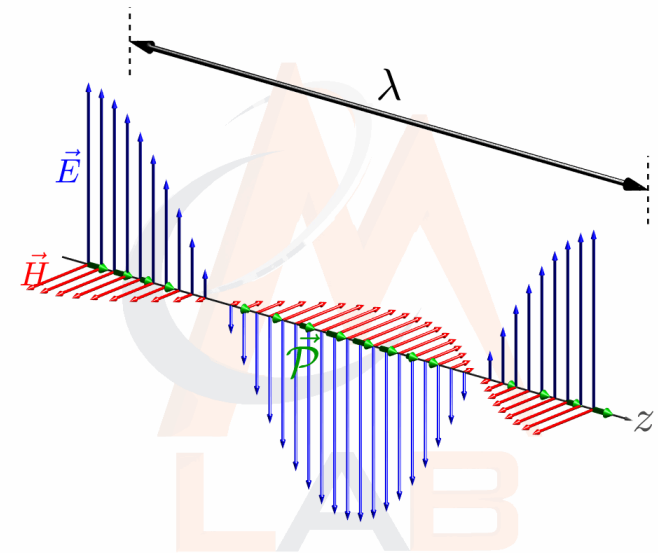
Iradijansa predstavlja srednju snagu koja pada na jedinicu površine, te je određena srednjom vrednošću S :

$$I = \langle S \rangle_T = \epsilon c E_m^2 \langle \sin^2(\omega t - kx) \rangle_T = \frac{1}{2} \epsilon c E_m^2.$$

Kod ravanskog EM talasa iradijansa je jednaka intenzitetu.

EM talasi vrše pritisak na površinu A na koju padaju:

$$p_r = \frac{I_{net}}{A} = \frac{I_{in} - (-I_{out})}{A}.$$

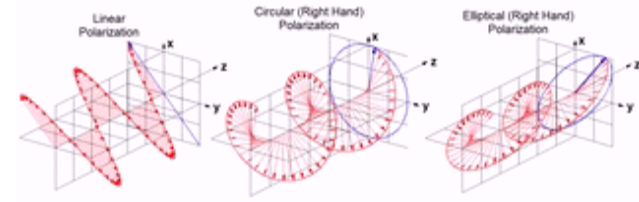


Polarizacija

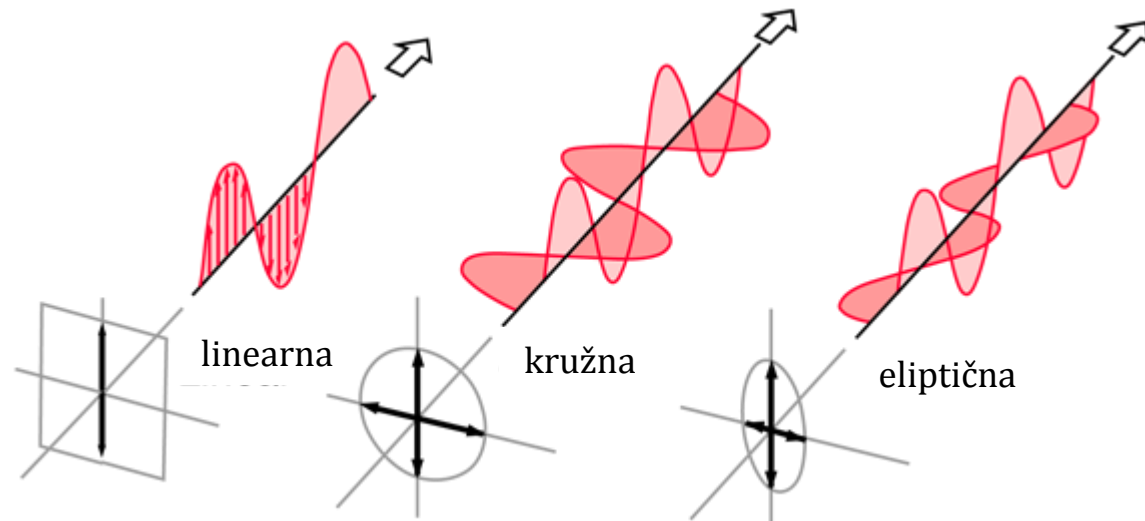
Za ravanski EM talas koji se prostire duž z – ose:

$$\vec{E}_x(x, t) = E_{m,x} \sin(\omega t - kx) \vec{e}_x,$$

$$\vec{E}_y(x, t) = E_{m,y} \sin(\omega t - kx + \delta) \vec{e}_y.$$



MakeAGIF.com



linearna:

$$E_{m,x} = E_{m,y} = E_m,$$
$$\delta = 0$$

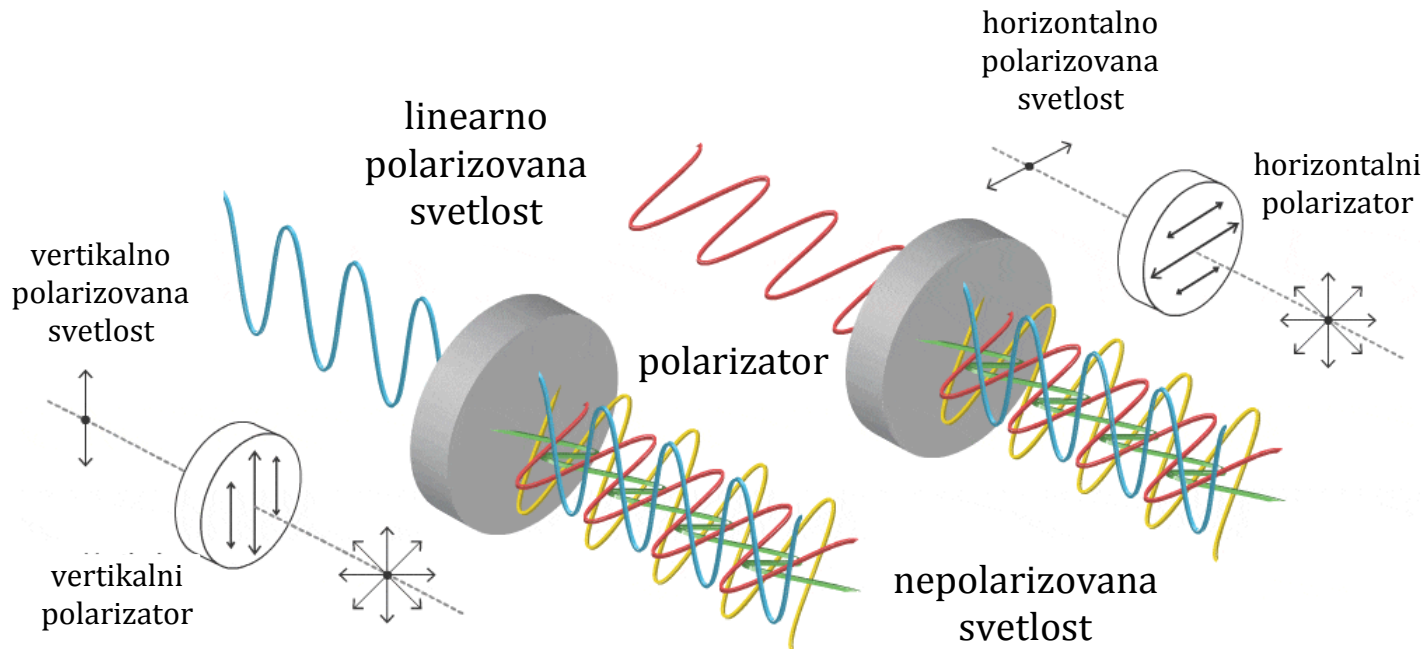
kružna:

$$E_{m,x} = E_{m,y} = E_m,$$
$$\delta = \pi/2$$

eliptična:

$$E_{m,x} \neq E_{m,y},$$
$$\forall \delta$$

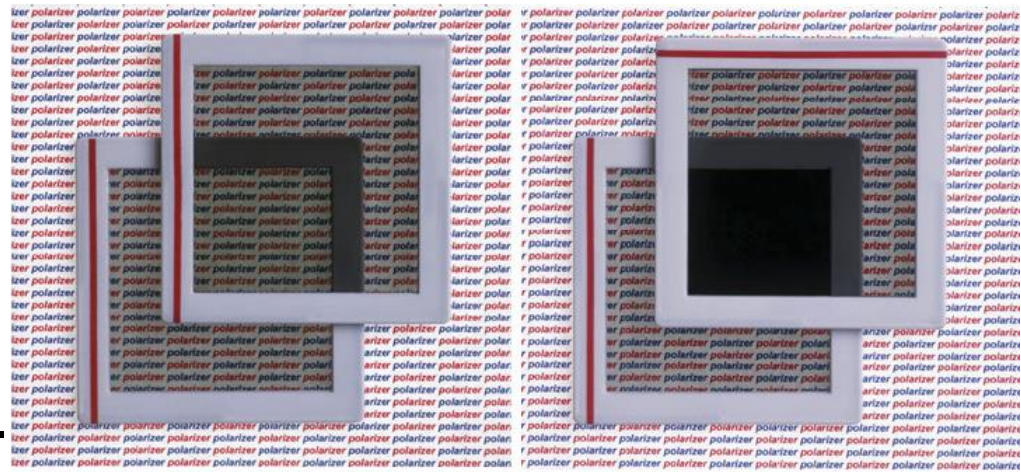
Polarizatori i Malusov zakon



Malusov zakon:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

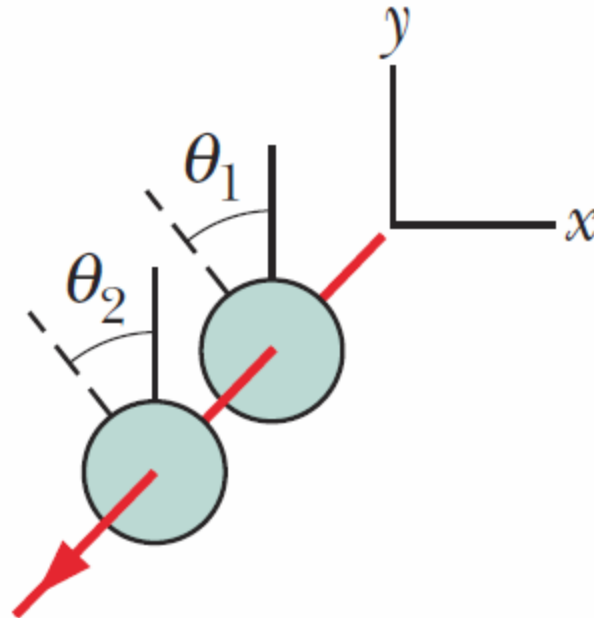
θ je ugao između transmisi-
one ose polarizatora i anali-
zatora, a I_0 upadni intenzitet.



Primer: Polarizacija i Malusov zakon

Na slici su prikazana dva planparalelna polarizaciona sloja pri čemu su uglovi između transmisione ose slojeva i y ose $\theta_1 = 70^\circ$ i $\theta_2 = 90^\circ$. Snop svetlosti koji se kreće duž z ose ima intenzitet $I_0 = 43 \text{ W/m}^2$ i prolazi kroz polarizacione pločice. Odrediti intenzitet na izlazu iz sistema ukoliko je ulazna svetlost:

- nepolarizovana,
- polarizovana duž y ose.

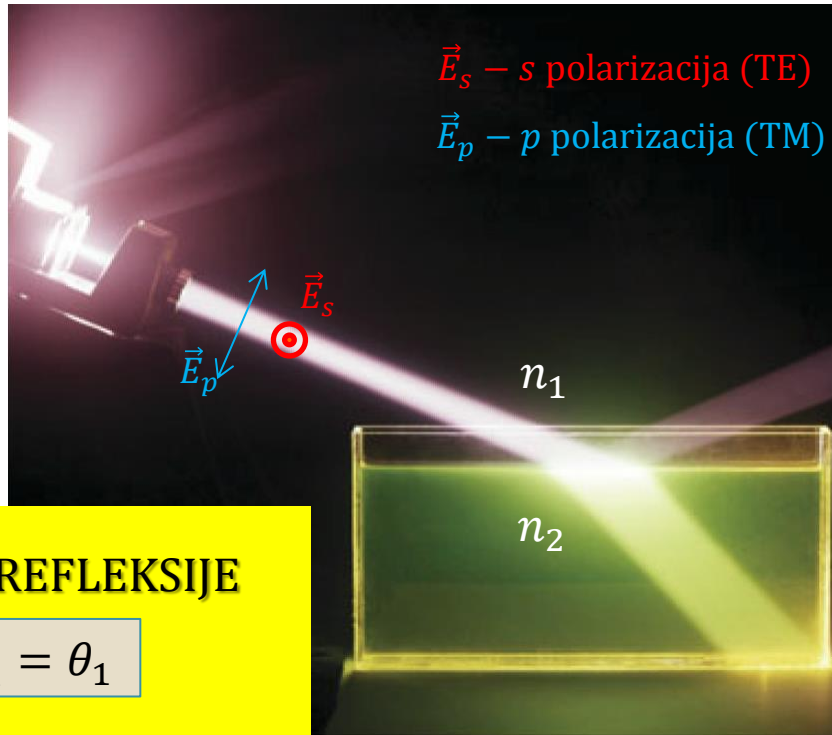


Rešenje:

a) 19 W/cm^2 ,

b) $4,44 \text{ W/cm}^2$

Frenelovi koeficijenti: refleksija i refrakcija EM talasa



ZAKON REFLEKSIJE

$$\theta'_1 = \theta_1$$

ZAKON REFRAKCIJE

Šnelov zakon

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

Koeficijenti refleksije R i transmisije T snage:

$$R = |r|^2$$

$$T = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} |t|^2$$

Amplitudski koeficijenti refleksije r i transmisije t :

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

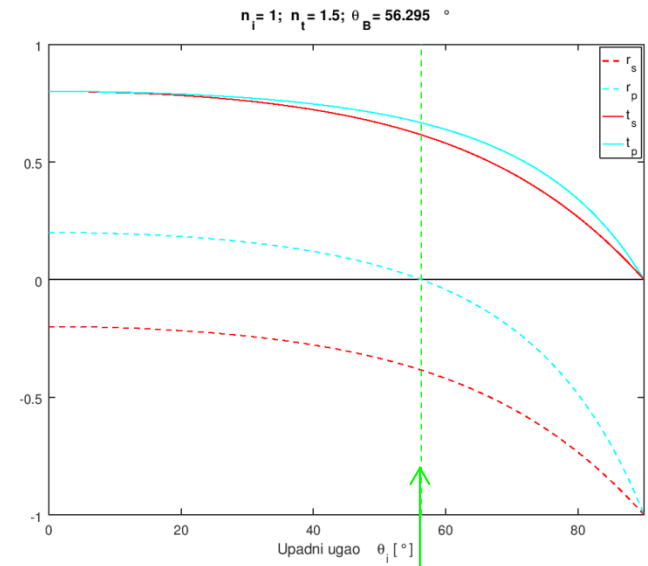
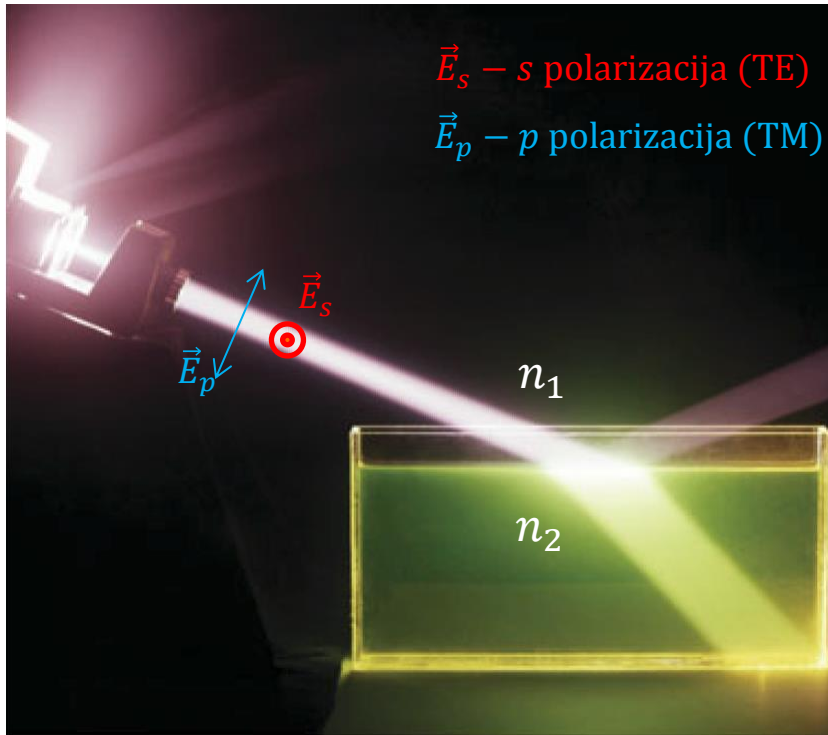
$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

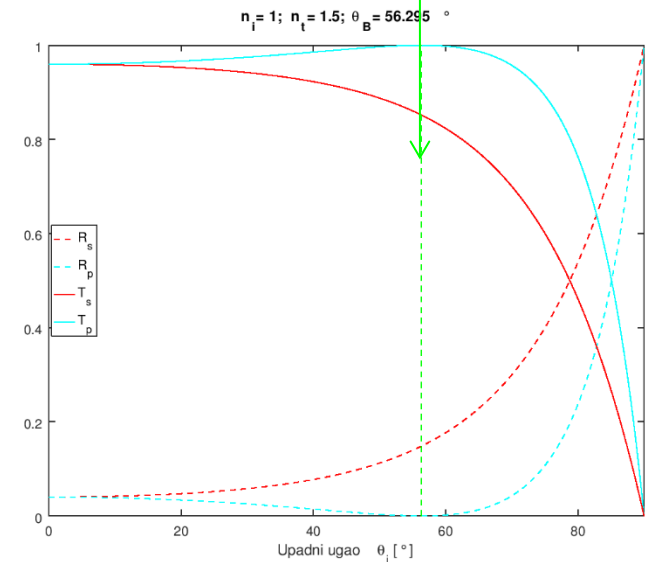
$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

Refleksija i refrakcija EM talasa

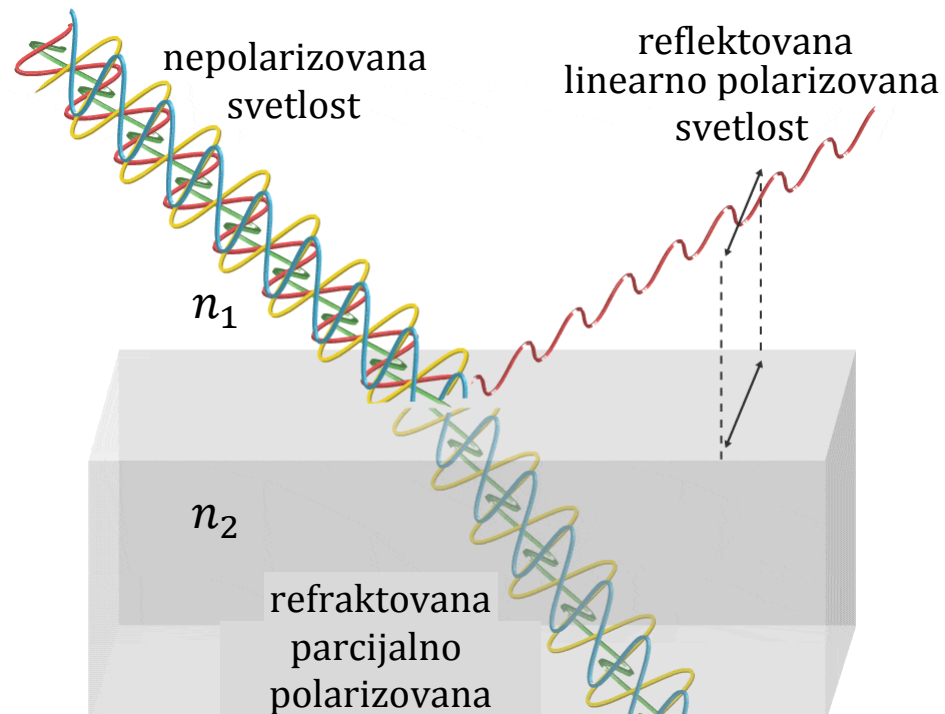
$(n_2 > n_1)$



Brusterov ugao θ_B



Polarizacija refleksijom

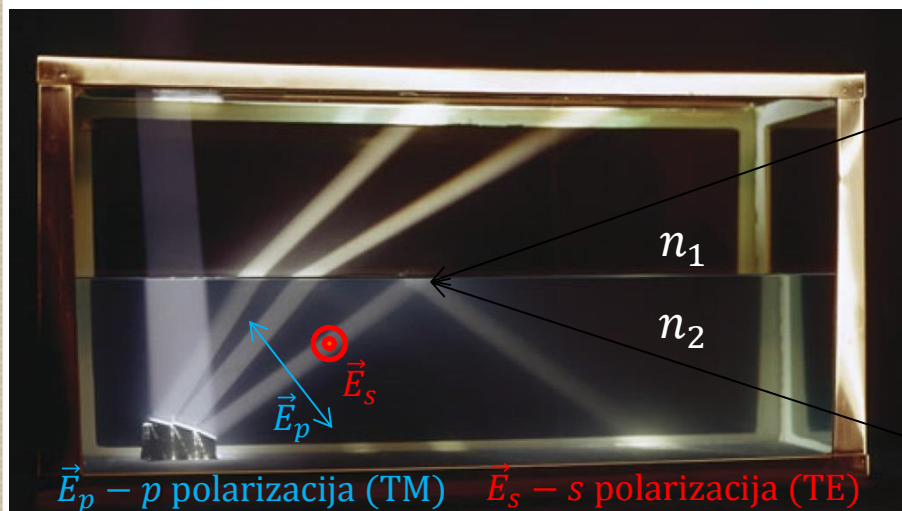


Brusterov ugao:

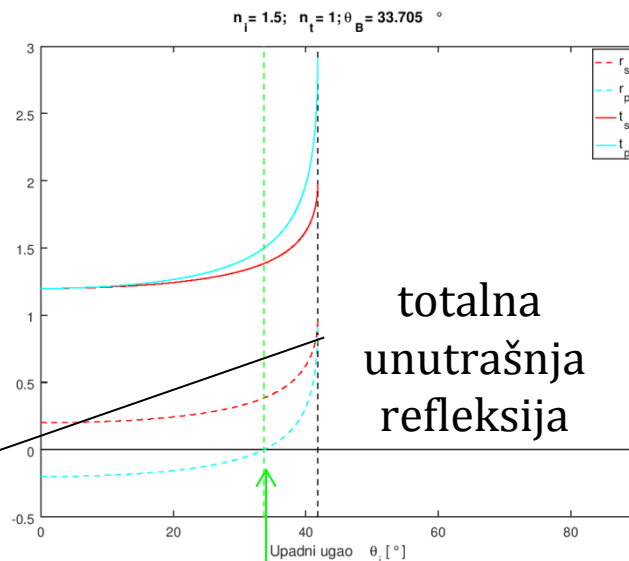
$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Refleksija i refrakcija EM talasa

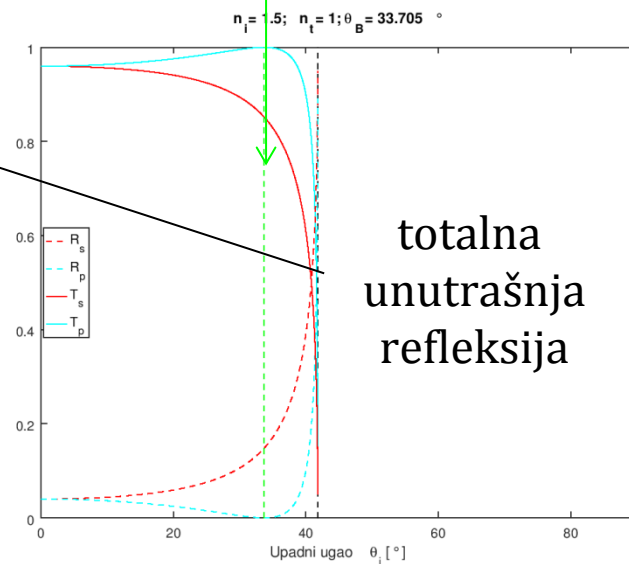
$(n_2 < n_1)$



$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



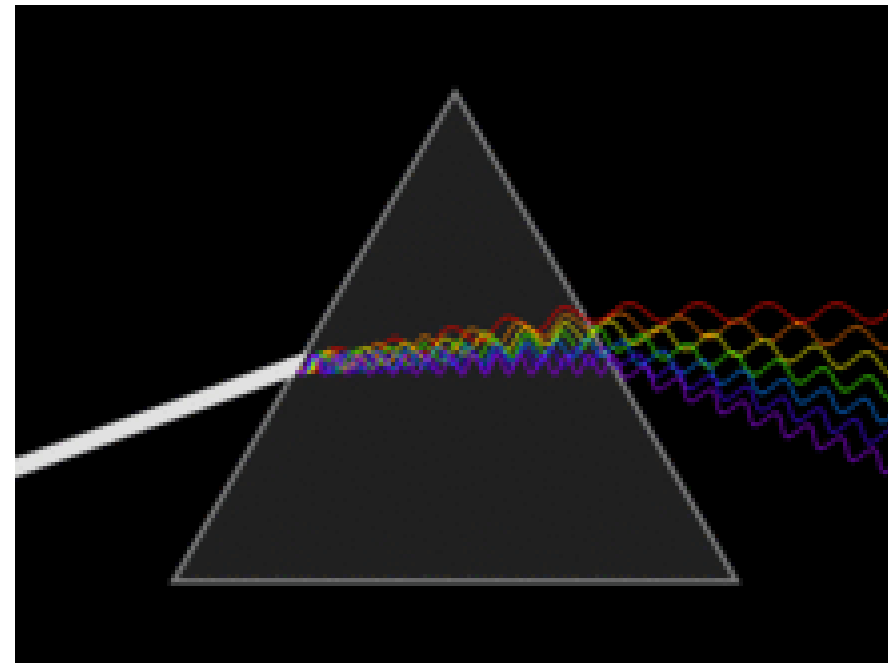
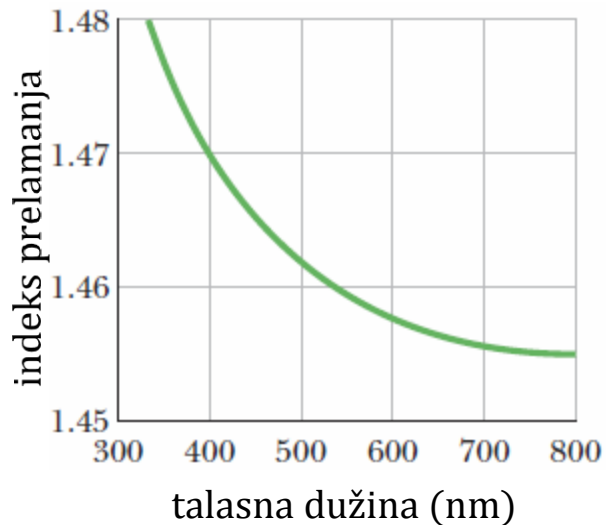
Brusterov ugao θ_B



Hromatska disperzija svetlosti

Košijev zakon:

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots$$



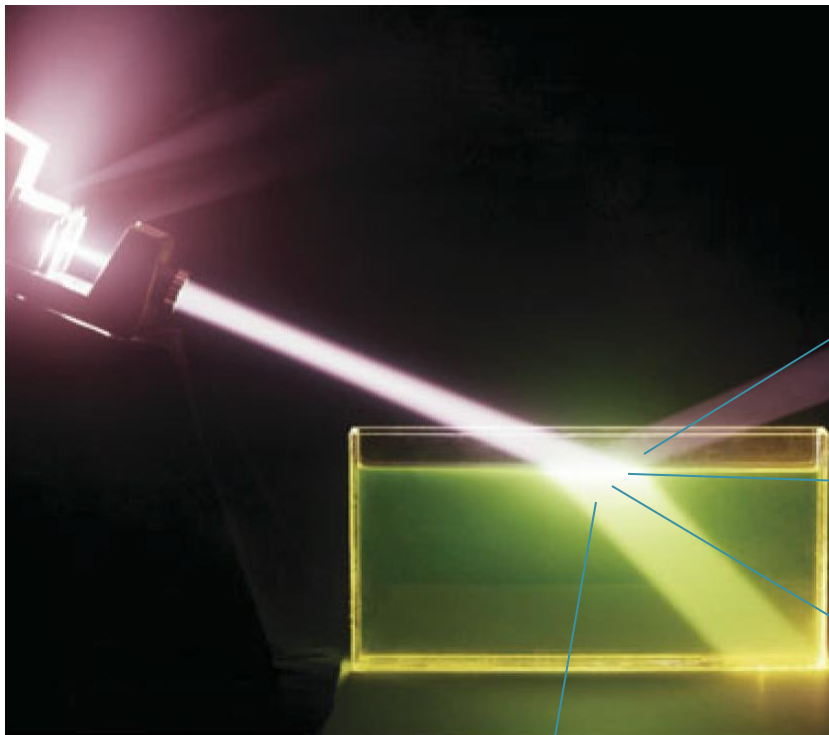
Konceptualna predstava disperzije usled razlike u talasnim dužinama zračenja koje "gradi" belu svetlost.

Primer: Nebo je preko dana plave boje, a Sunce je na zalasku crveno.



Geometrijska optika

Refleksija i prelamanje na granici sa optički gušćom sredinom ($n_2 > n_1$)



odbije se pod istim uglom
ZAKON REFLEKSIJE

$$\theta'_1 = \theta_1$$

prelamanje određeno indeksima
prelamanja n obe sredine

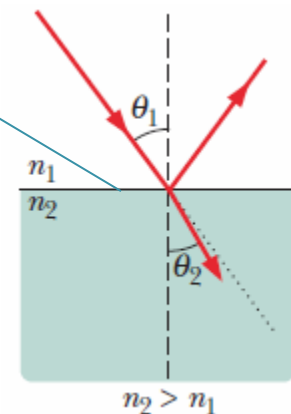
$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\text{brzina svetlosti u vakuumu}}{\text{brzina svetlosti u sredini}}$$

ZAKON REFRAKCIJE

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

Šnelov zakon

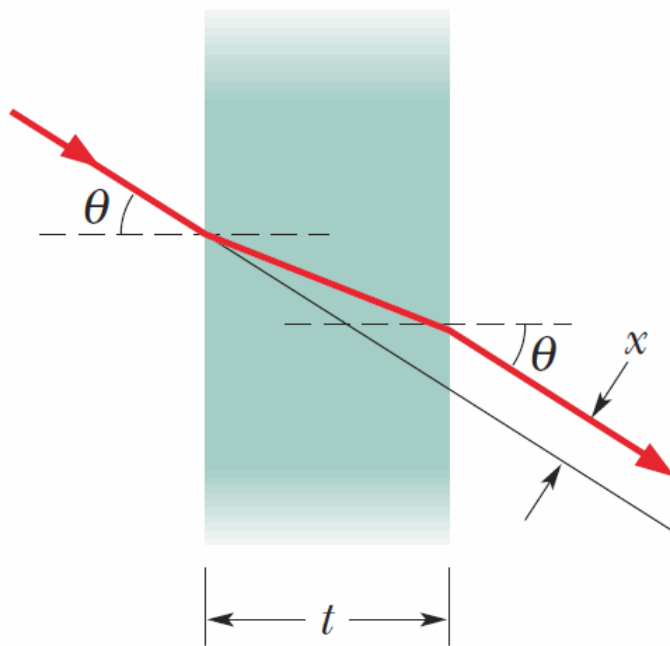
prelamanje
ka normalni za
 $n_2 > n_1$



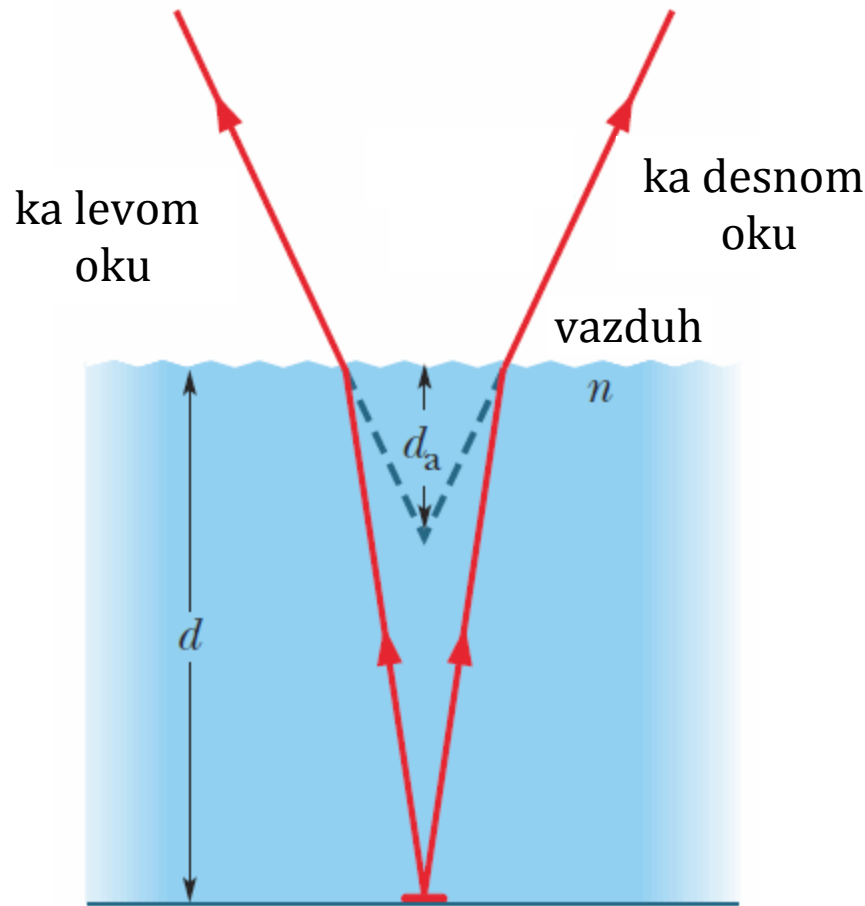
Primer I: prelamanje kroz pločicu

Na slici je prikazana planparalelna pločica indeksa prelamanja n u vazduhu indeksa prelamanja $n_0 \approx 1$. Snop svetlosti pada na pločicu pod uglom θ . Odrediti pomeraj ose snopa x na izlazu iz pločice. Dati približnu vrednost za mali ugao θ .

$$\text{Rešenje: } x = t \cdot \sin \theta \left[1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right]$$



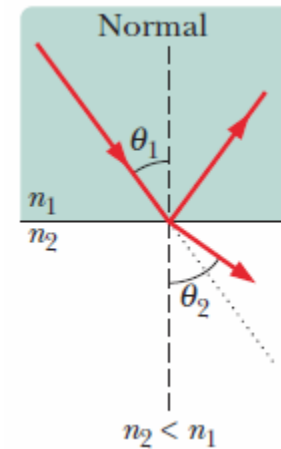
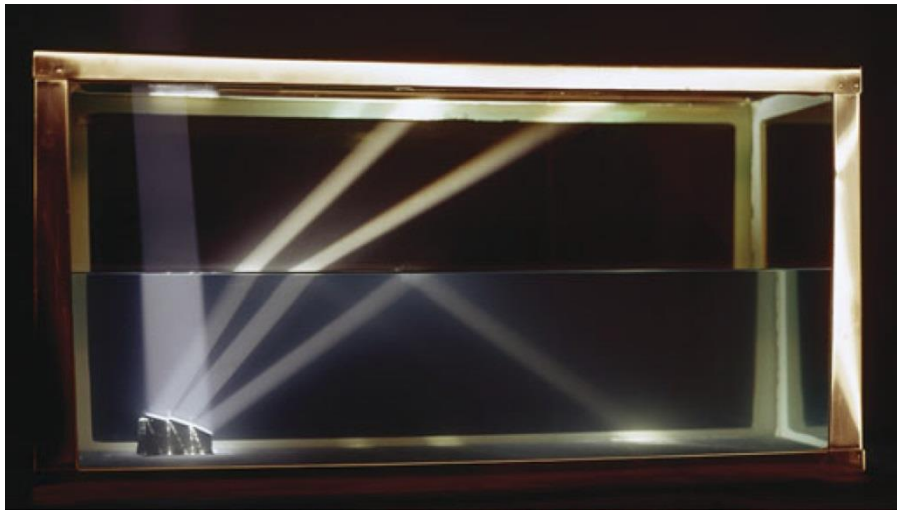
Primer 2: prividna dubina



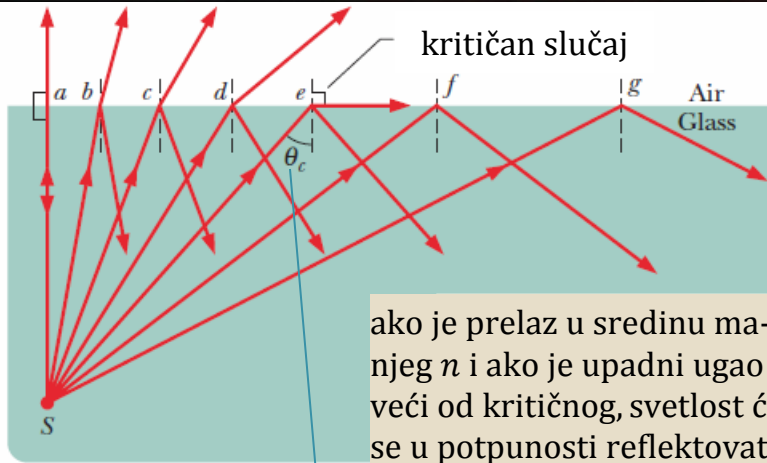
Čovek gleda novčić na dnu bazena. Ukoliko mu se čini da je on na dubini d_a , kolika je dubina bazena d ? Indeks prelamanja vode n je poznat. Površina vode je idealno mirna.

Rešenje: $d = nd_a$

Refleksija i prelamanje na granici sa optički ređom sredinom ($n_2 < n_1$)



prelamanje od normale za $n_2 < n_1$



ako je prelaz u sredinu manjeg n i ako je upadni ugao veći od kritičnog, svetlost će se u potpunosti reflektovati.

KRITIČAN UGAO

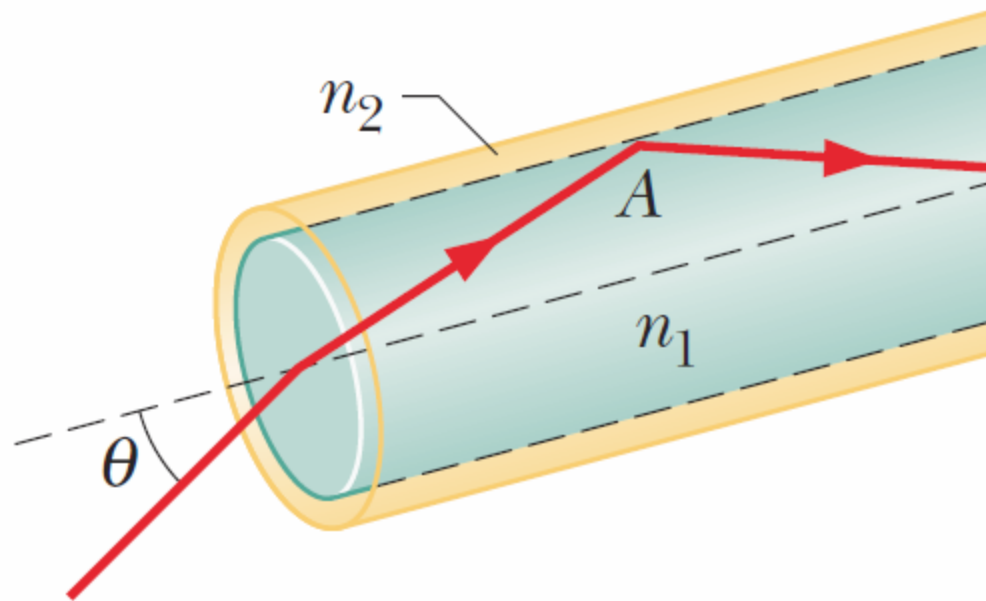
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$n_2 < n_1$$

kada je vrednost upadnog ugla veća od kritične
totalna unutrašnja refleksija

Primer: totalna unutrašnja refleksija

Na slici je prikazano optičko vlakno. Indeks prelamanja jezgra vlakna je $n_1 = 1,58$, a indeks prelamanja plastičnog omotača je $n_2 = 1,53$. Koji je maksimalni ugao θ pod kojim se u vlakno sme uvesti snop svetlosti, tako da svetlost ostane u vlaknu?

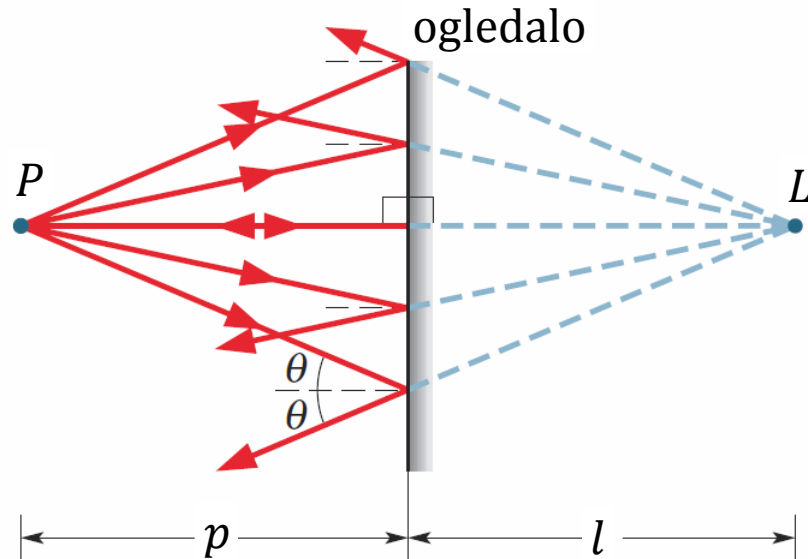


Rešenje: $\theta = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 23,22^\circ$

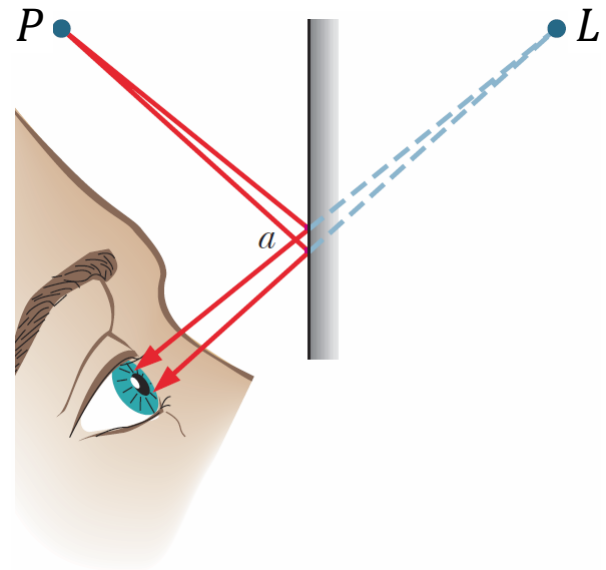
Fatamorgana: $n = f(h)$



Ravna ogledala



Zranci se odbijaju od ravnog ogledala.
Produžeci zraka se seku iza ogledala.
Svetlost ne prolazi kroz L (imaginaran).



Za posmatrača izgleda kao da
zranci koji polaze iz P (izvor),
dolaze iz tačke L (lik).

Položaj lika:

$$l = -p$$

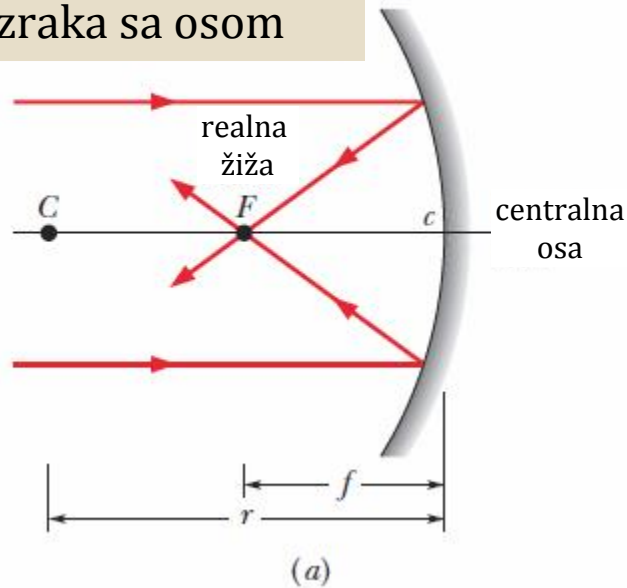
lik je imaginaran

Uvećanje lika:

$$M = 1$$

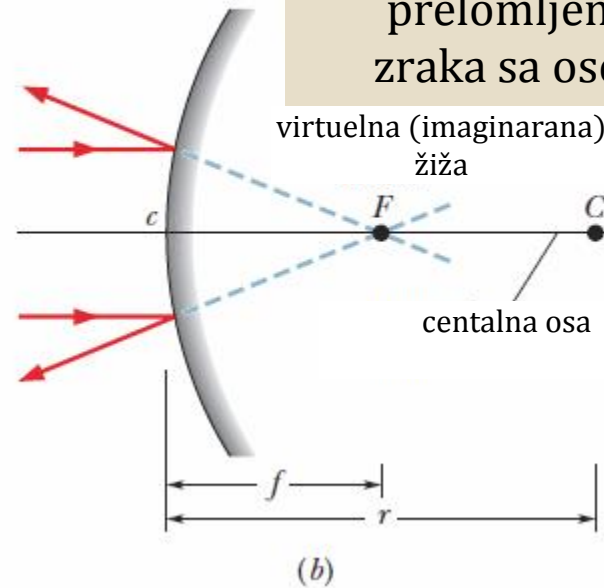
Sferna ogledala

žiža se nalazi u
preseku paralelnih
zraka sa osom



konkavno

žiža se nalazi u
produžetku preseka
prelomljenih
zraka sa osom

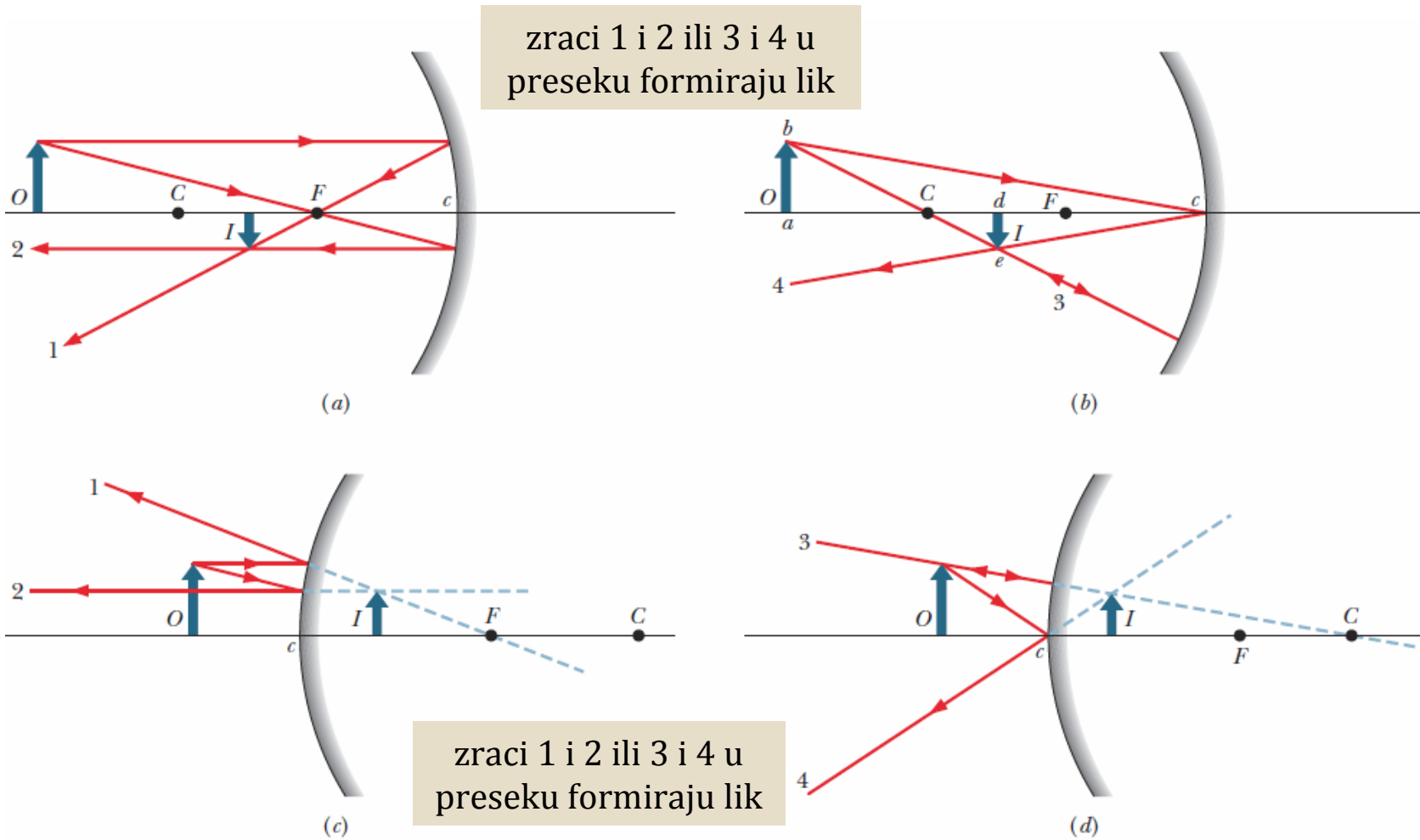


konveksno

Položaj žiže:

$$f = \frac{R}{2}$$

Sferna ogledala: predmet i lik

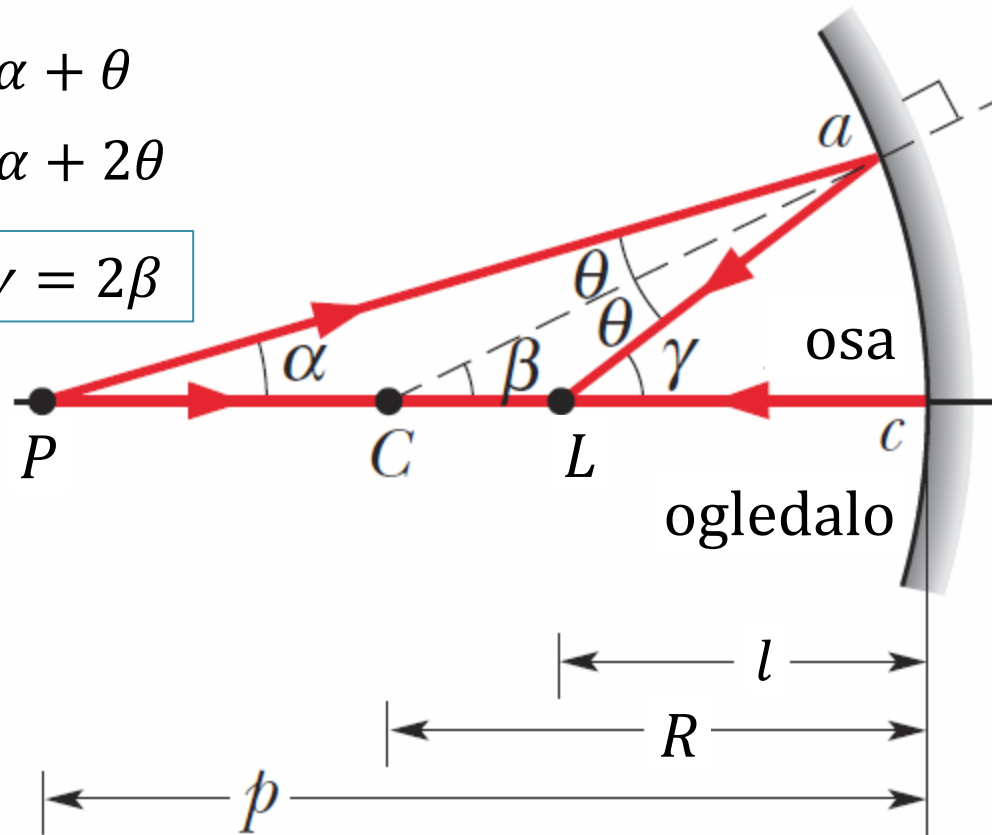


Jednačina ogledala: izvođenje

$$\beta = \alpha + \theta$$

$$\gamma = \alpha + 2\theta$$

$$\alpha + \gamma = 2\beta$$



Paraksijalna
aproksimacija:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p}$$

$$\tan \beta \approx \beta \approx \frac{\widehat{ac}}{R}$$

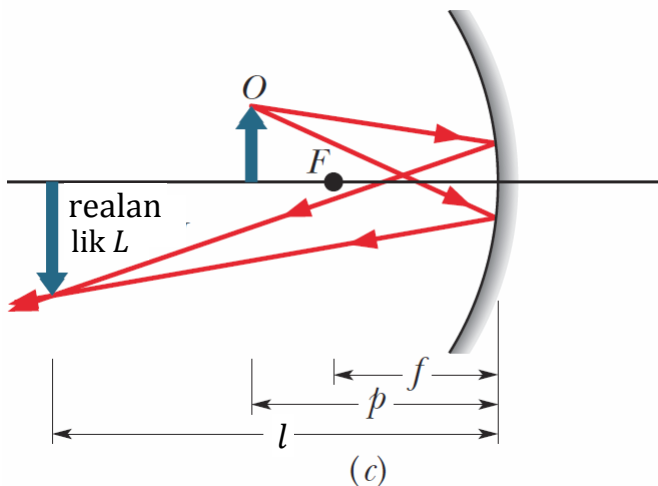
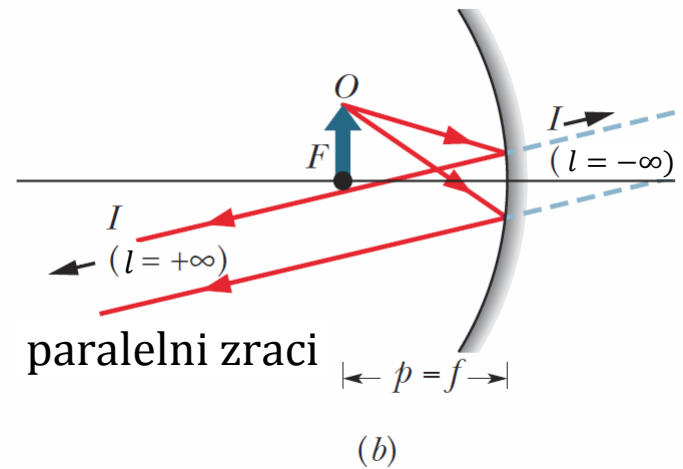
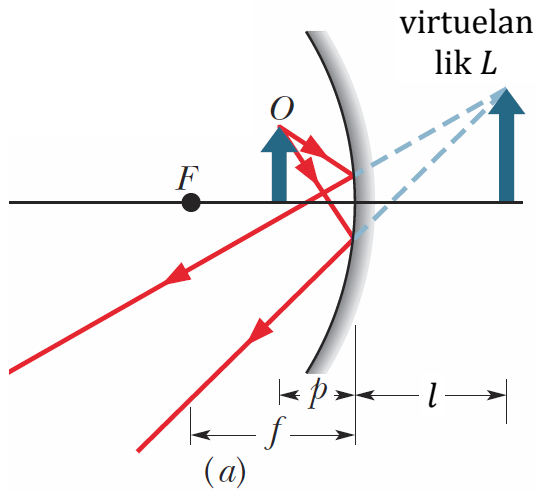
$$\tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{l}$$

$$\frac{\widehat{ac}}{p} + \frac{\widehat{ac}}{l} = 2 \frac{\widehat{ac}}{R}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R}$$

$$f = \frac{R}{2}$$

Konkavno ogledalo



Jednačina ogledala:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}$$

Uvećanje:

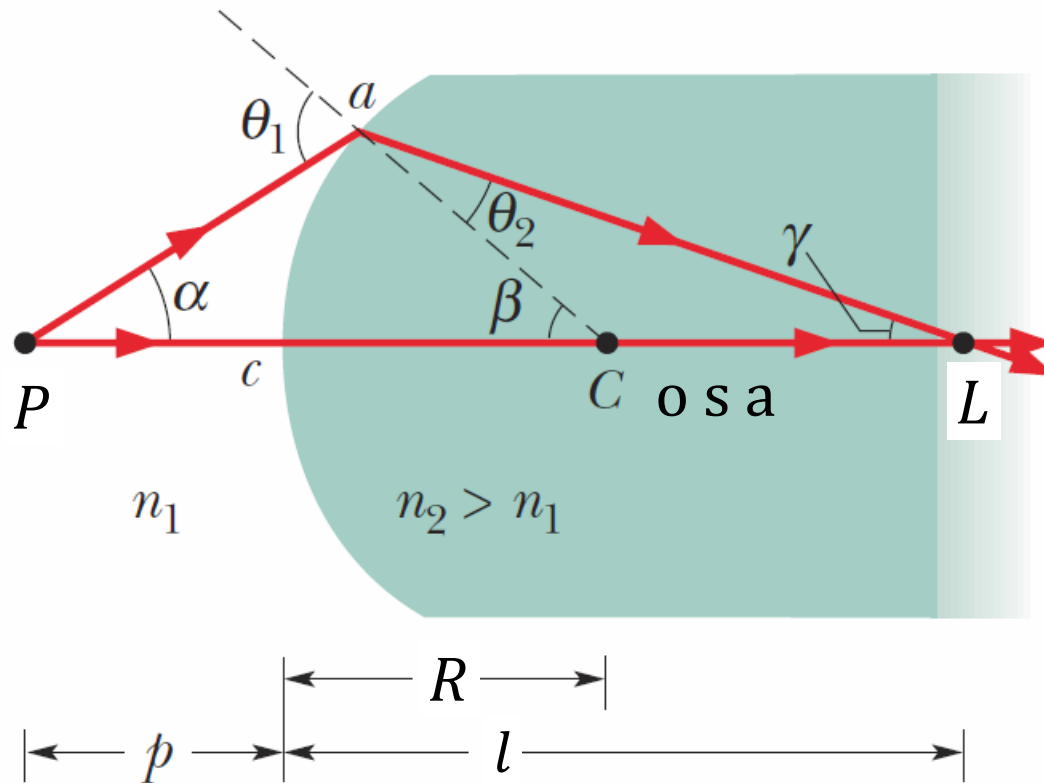
$$M = -\frac{l}{p}$$

Žižna daljina:

$$f = \frac{R}{2}$$

$R > 0$ konkavno
 $R < 0$ konveksno

Prelamanje na sfernoj površi: izvođenje



Paraksijalna
aproksimacija:

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{p}$$

$$\tan \beta \approx \beta \approx \frac{\widehat{ac}}{R}$$

$$\tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{\widehat{ac}}{l}$$

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

$$\beta = \theta_1 - \alpha = \theta_2 + \gamma$$

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

$$\left. \begin{aligned} n_1(\alpha + \beta) &= n_2(\beta - \gamma) \\ n_1\alpha + n_2\gamma &= \beta(n_2 - n_1) \end{aligned} \right\}$$

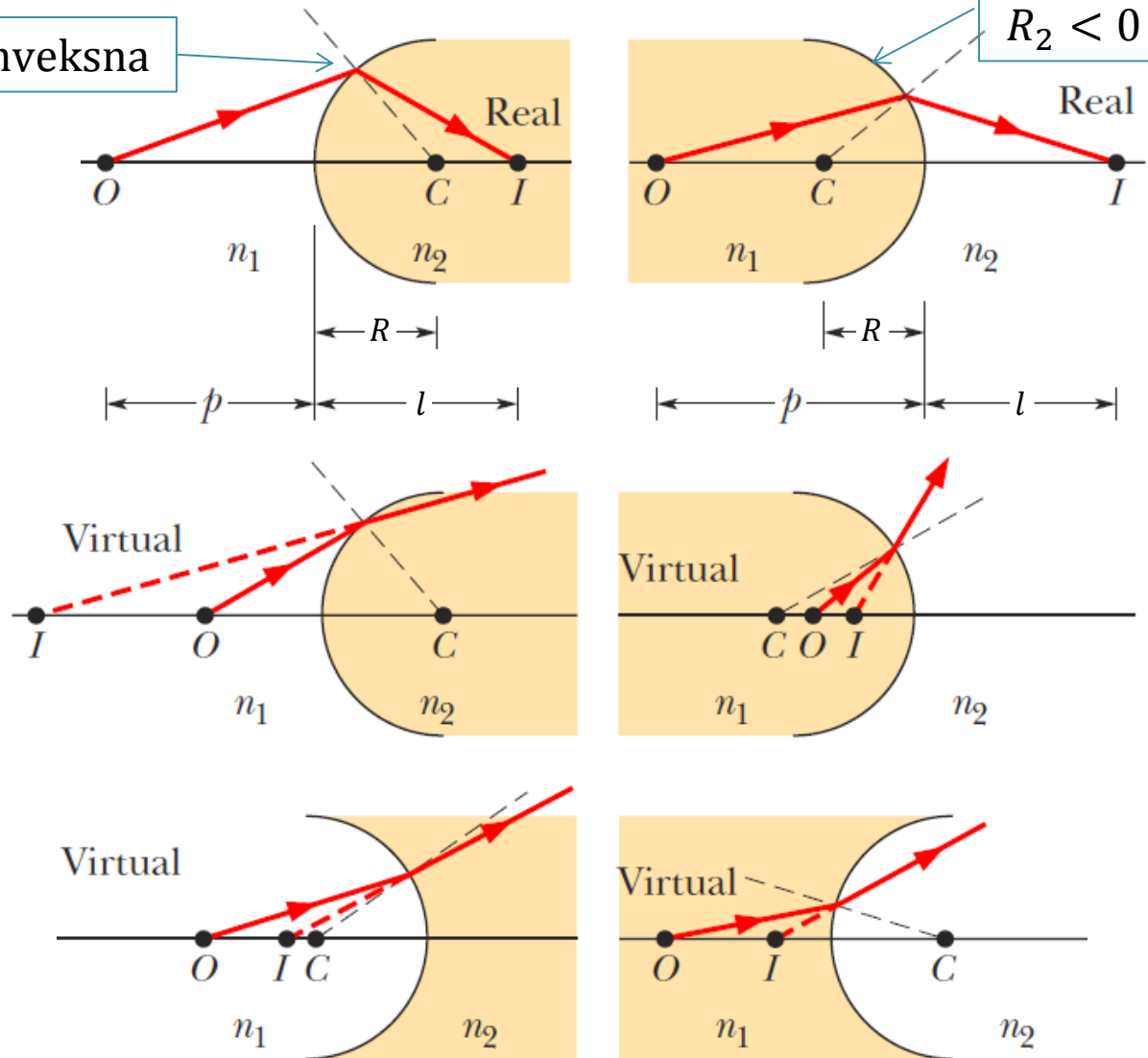
$$n_1 \frac{\widehat{ac}}{p} + n_2 \frac{\widehat{ac}}{l} = (n_2 - n_1) \frac{\widehat{ac}}{R}$$

Prelamanje na sfernoj površi

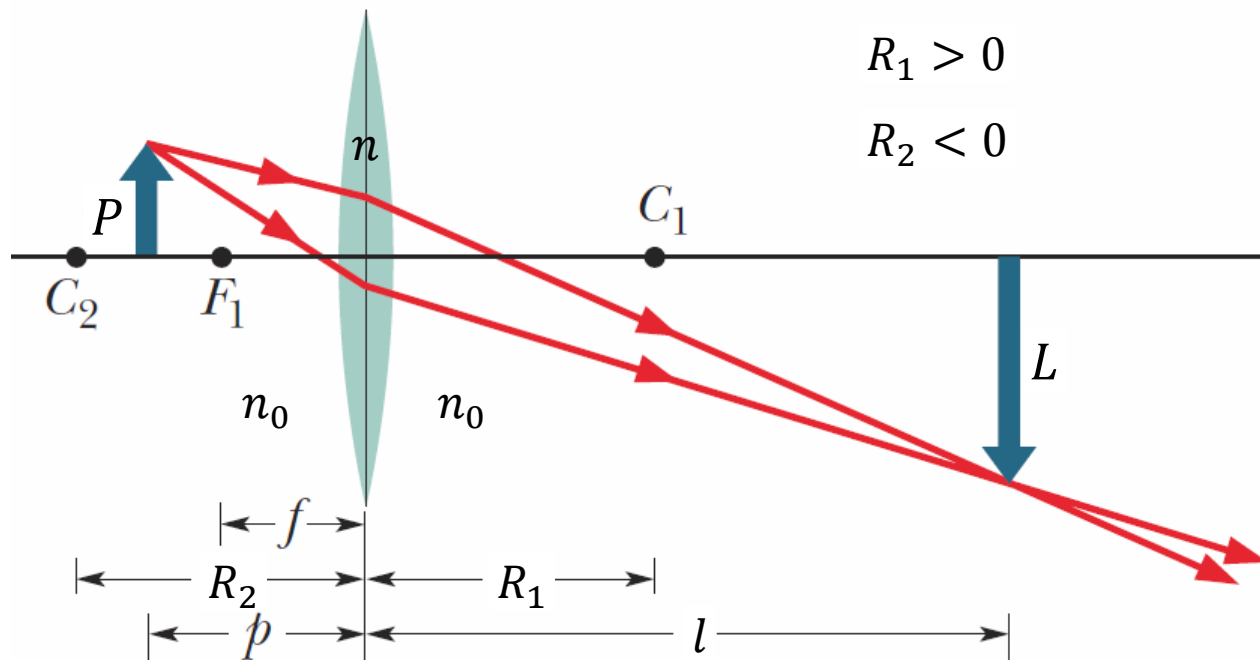
$R_1 > 0$ konveksna

$R_2 < 0$ konkavna

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{l} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$



Jednačina tankog sočiva



$$R_1 > 0$$

$$R_2 < 0$$

l' – lik pri prelamanju na prvoj površi

p' – predmet za prelamanje na drugoj površi

$$l' = -p'$$

Prva površ:

$$\frac{n_0}{p} + \frac{n}{l'} = \frac{n - n_0}{R_1}$$

Druga površ:

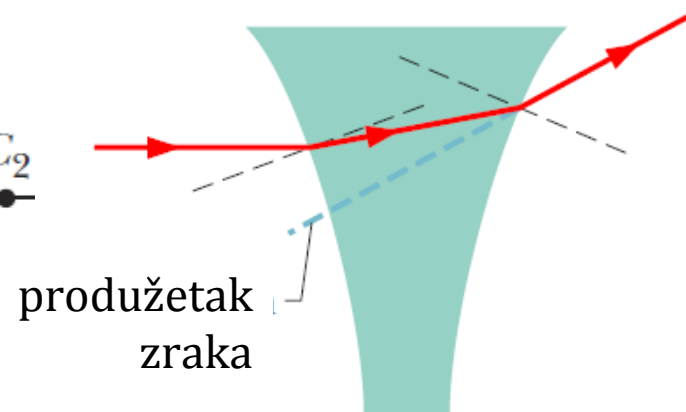
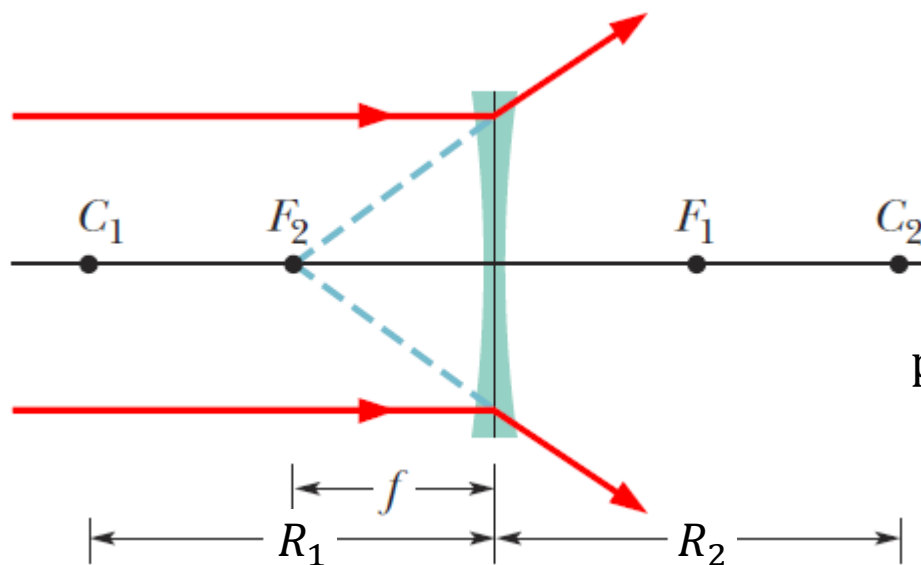
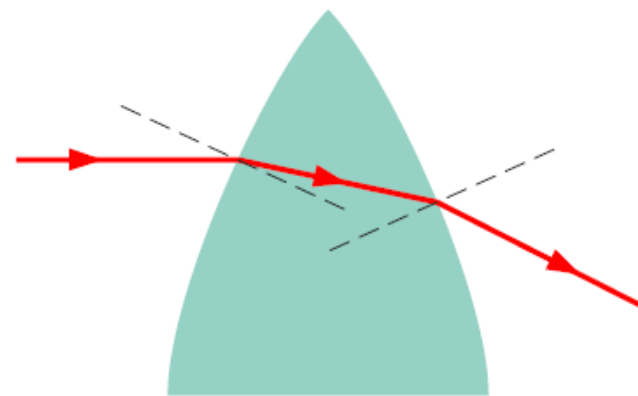
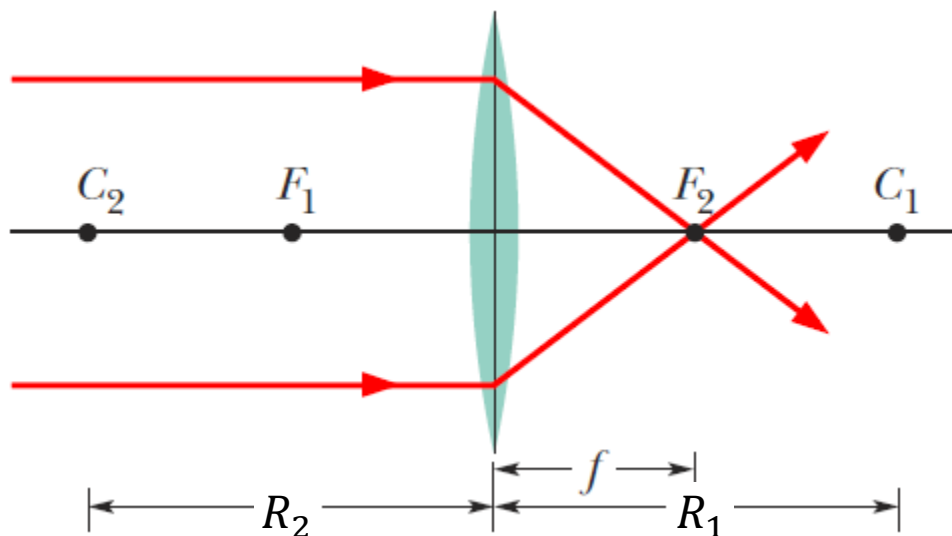
$$\frac{n}{p'} + \frac{n_0}{l} = \frac{n_0 - n}{R_2}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$

Tanko sočivo

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}$$

$$M = -\frac{l}{p}$$



Sabirna i rasipna sočiva



(1)



(2)



(3)

← *sabirna sočiva $f > 0$*
(deblja na sredini)



(4)



(5)

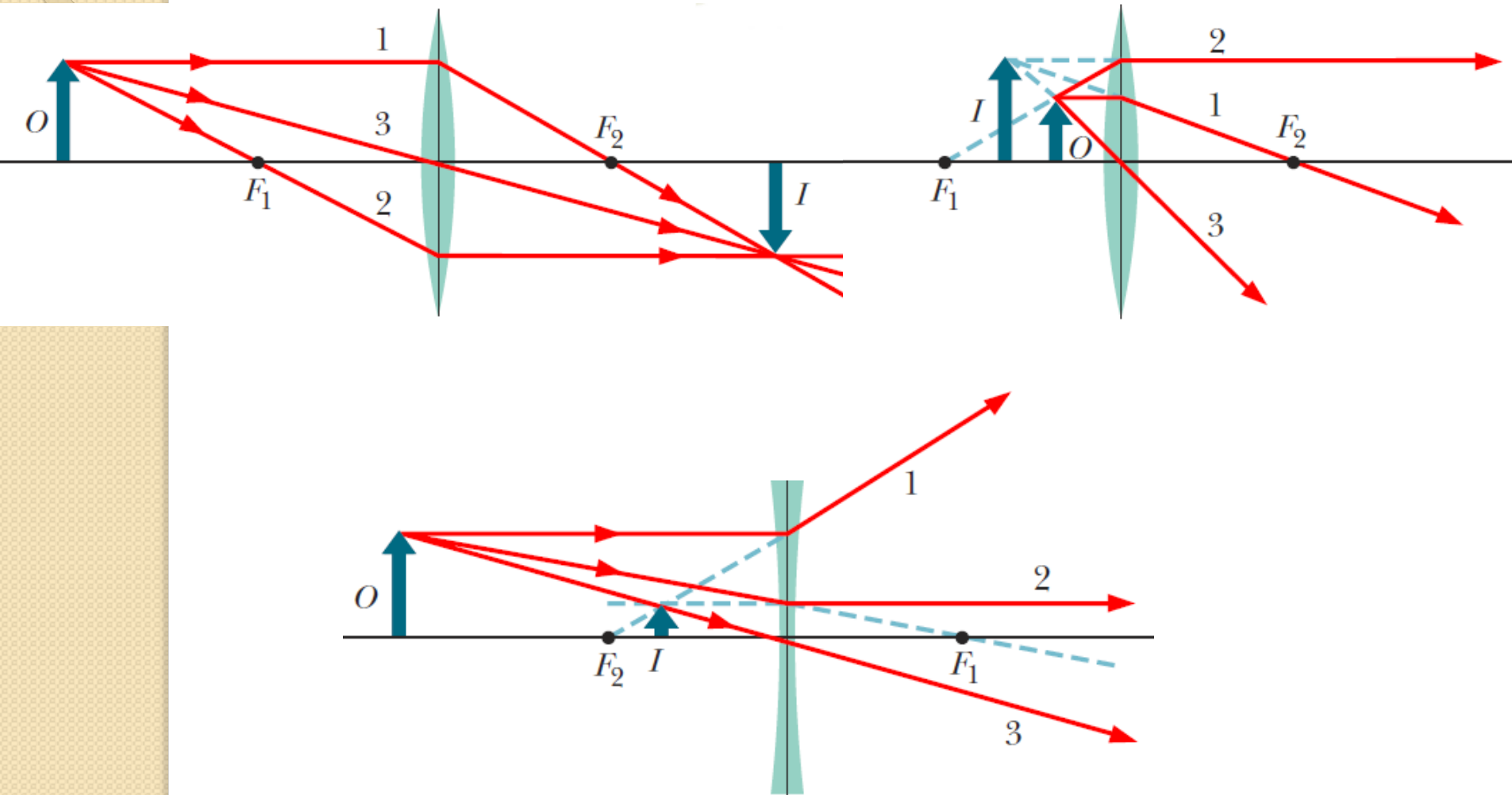


(6)

← *rasipna sočiva $f < 0$*
(deblja na krajevima)

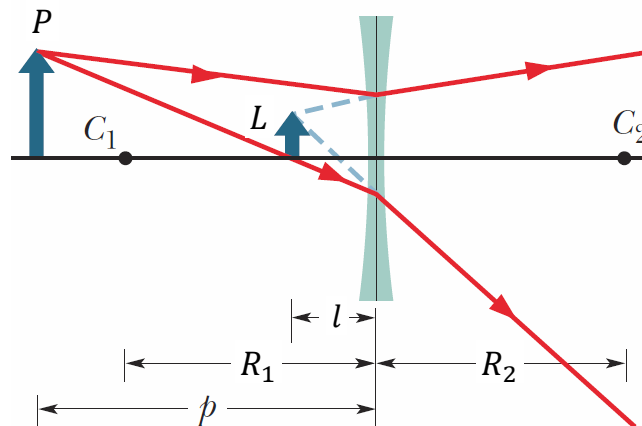
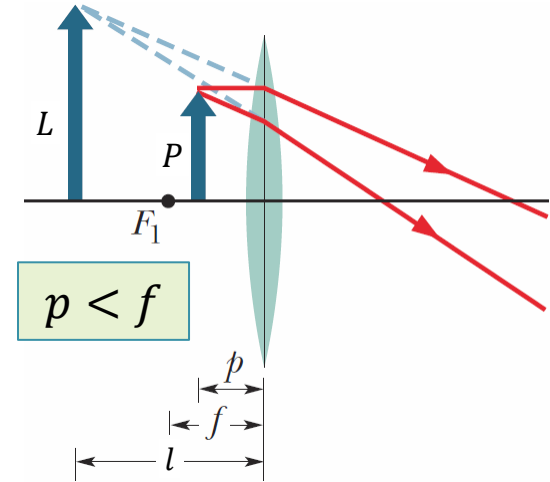
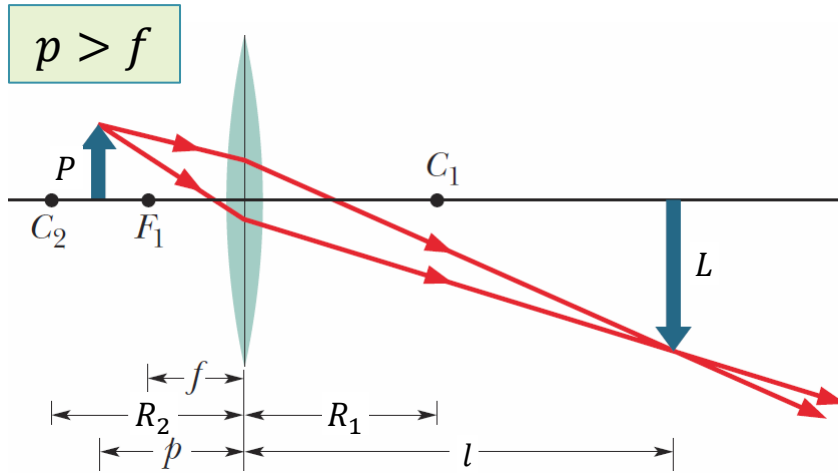
Konstruisanje lika

Potrebna dva od tri zraka



Položaj lika

Sabirna sočiva ($f > 0$) daju i realne i imaginarne likove



Rasipna sočiva ($f < 0$) daju samo imaginarne ↑ umanjene likove

Sistem dva sočiva

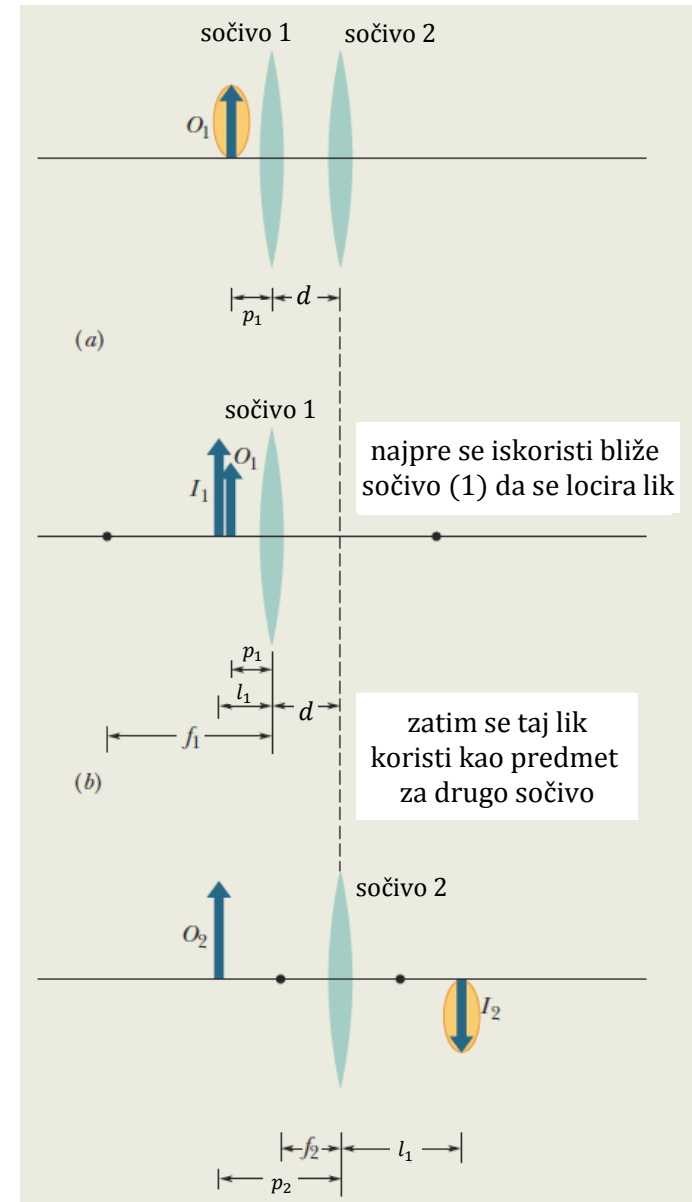
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

poznato d, f_1, f_2 i p_1

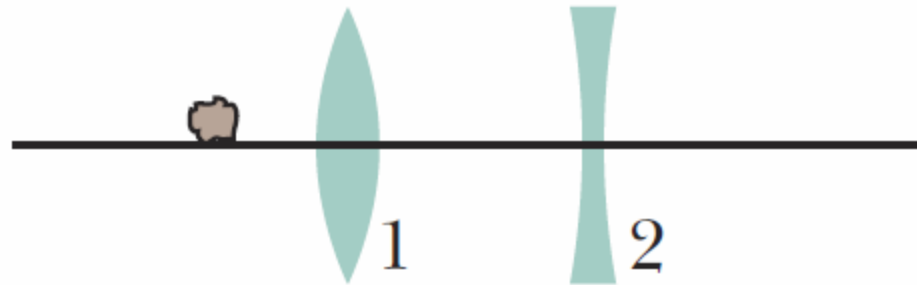
1) naći l_1 :
$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{l_1}$$

2) odrediti p_2 :
$$p_2 = d - l_1$$

3) naći l_2 :
$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{l_2}$$



Primer: Sistemi sočiva



Primer 1: Zrno peska se nalazi na osi na rastojanju 3 cm od sabirnog sočiva 1 žižne daljine $f_1 = 4$ cm. Drugo rasipno sočivo 2 je na rastojanju 8 cm iza sočiva 1 i ima $f_2 = -4$ cm. (a) Odrediti položaj lika zrna peska. (b) Da li je lik realan ili imaginaran? (c) Da li je lik uspravan ili obrnut?

Rešenje:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f_1} \rightarrow l_1 = \frac{p_1 f_1}{p_1 - f_1} = -12 \text{ cm (imaginaran)}. \quad M_1 = -\frac{l_1}{p_1} = 4 (\uparrow).$$
$$p_2 = 12 \text{ cm} + d = 20 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_2} \rightarrow l_2 = \frac{p_2 f_2}{p_2 - f_2} = -3,33 \text{ cm (imaginaran)}. \quad M_2 = -\frac{l_2}{p_2} = \frac{1}{6} (\uparrow).$$

$$3,33 \text{ cm ispred drugog sočiva.} \quad M = M_1 M_2 = \frac{2}{3} (\uparrow, \text{ imaginaran, umanjen})$$

Pratiti prolaze kroz sistem

Tanko simetrično bikonveksno sočivo od stakla indeksa prelamanja $n_s = 3/2$ i poluprečnika krivina R , posrebreno je sa jedne strane i postavljeno u vodu $n_v = 4/3$. Odrediti žižnu daljinu sistema?

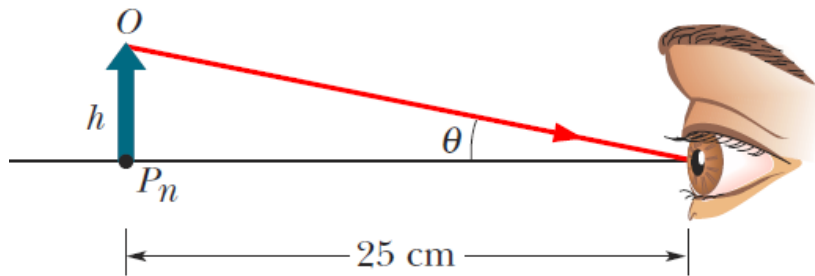
Svetlost prolazi kroz sočivo, reflektuje se od posrebrene površi (ogledalo) i opet prolazi kroz sočivo. To je praktično sistem 3 optička elementa na međusobnim rastojanjima $d = 0$. Ekvivalentna žižna daljina ovog sistema je

$$\frac{1}{f_e} = \frac{1}{f_s} + \frac{1}{f_o} + \frac{1}{f_s}$$

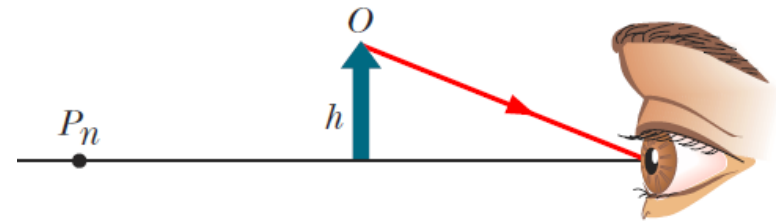
$$\frac{1}{f_s} = \left(\frac{n_s}{n_v} - 1 \right) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{-R} \right) = \left(\frac{3/2}{4/3} - 1 \right) \frac{2}{R} = \frac{1}{4R} \quad \text{i} \quad \frac{1}{f_o} = \frac{2}{R}$$

$$f_e = \frac{2}{5} R.$$

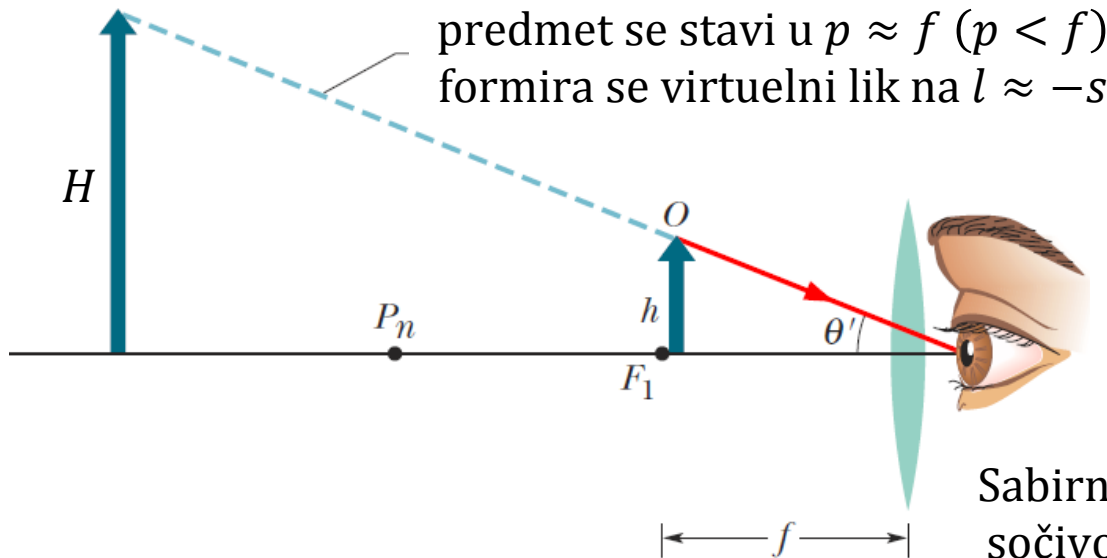
Optički instrumenti: Lupa



daljina jasnog vida $s = 25\text{ cm}$



predmet $p < s$ ne vidi se jasno

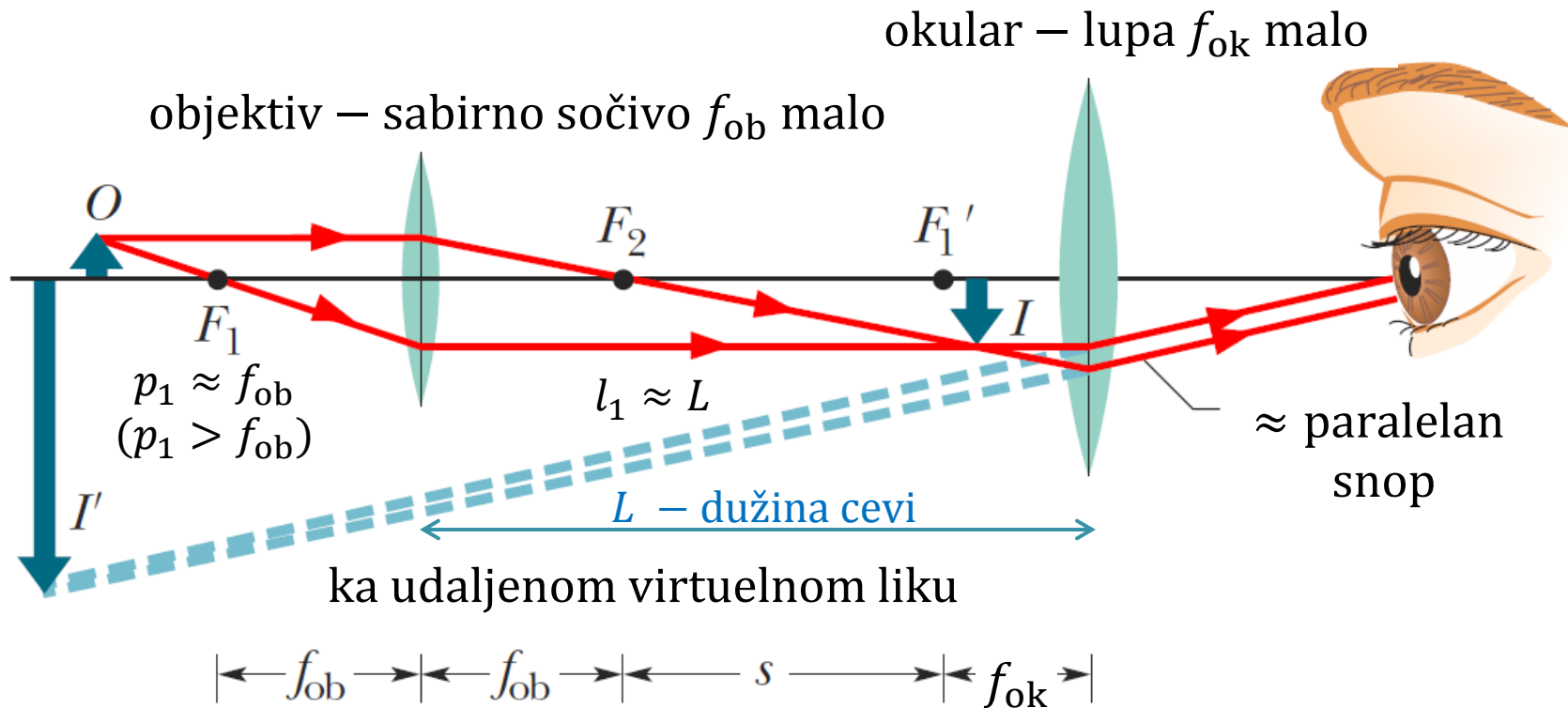


Sabirno
sočivo
blizu oka

Uvećanje:
$$M = \frac{H}{h} = \frac{s}{f}$$

$$M \approx \frac{25\text{ cm}}{f}$$

Optički instrumenti: Mikroskop



Uvećanje objektiva:

$$|M_{ob}| \approx \frac{L}{f_{ob}}$$

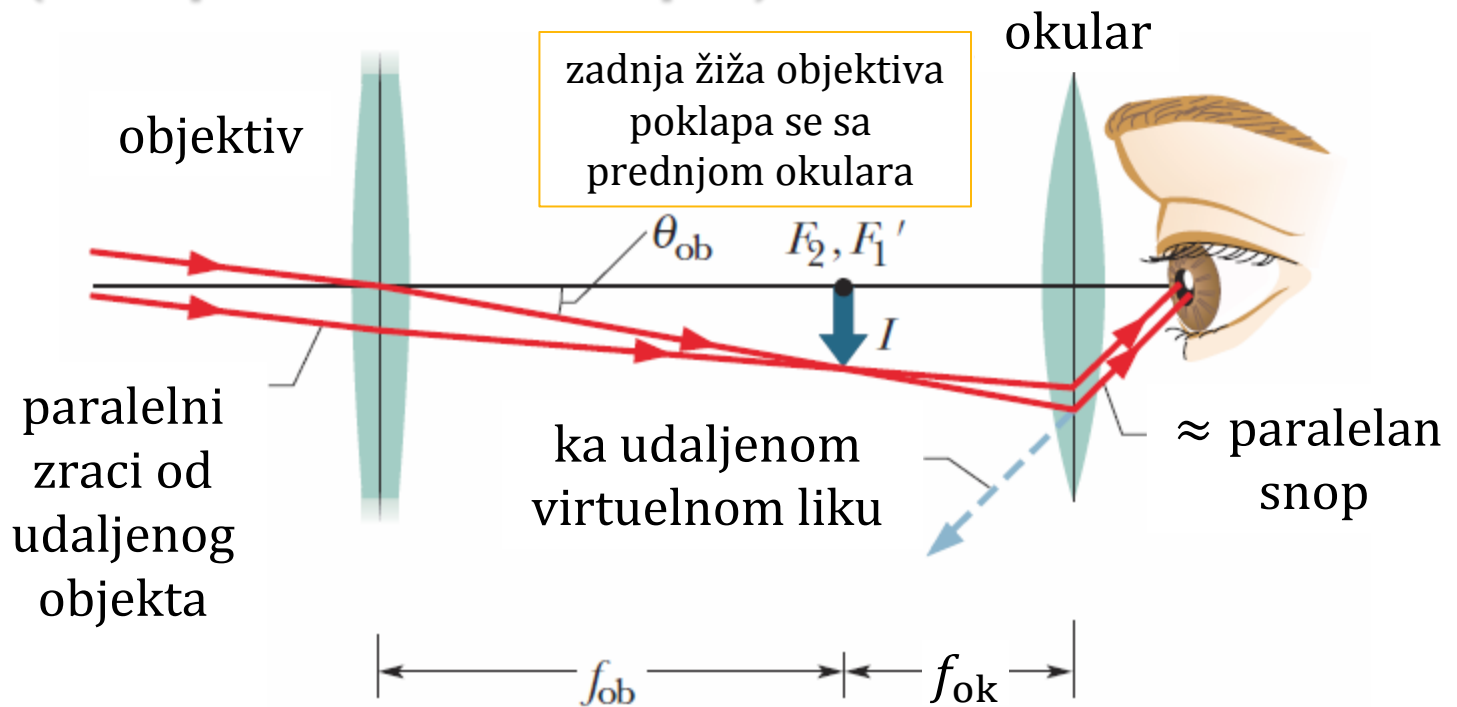
Uvećanje okulara:

$$M_{ok} \approx \frac{s}{f_{ok}}$$

Uvećanje mikroskopa:

$$|M| = |M_{ob}|M_{ok} \approx \frac{sL}{f_{ob}f_{ok}}$$

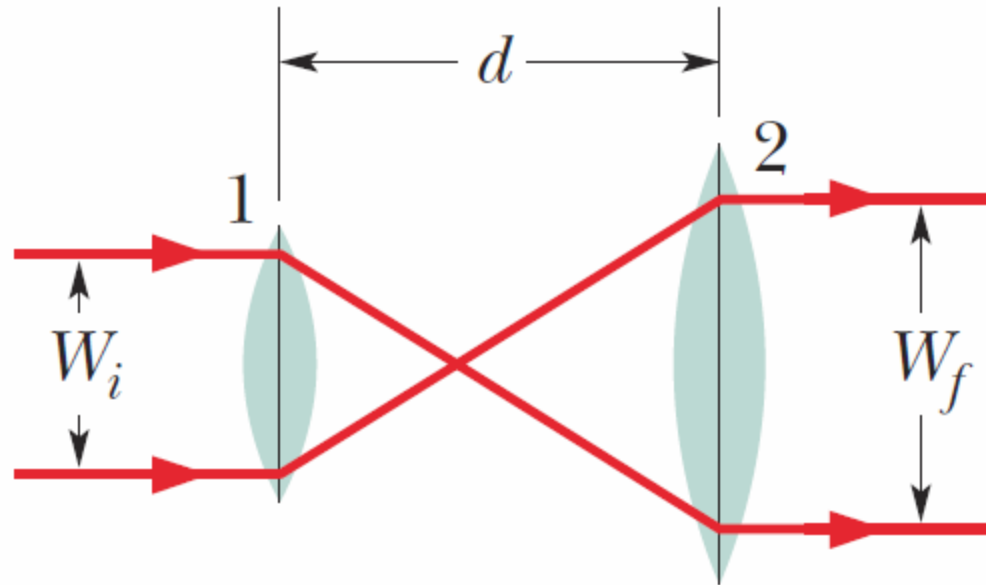
Optički instrumenti: Teleskop (ekspander snopa)



Uvećanje teleskopa:

$$M = -\frac{f_{ob}}{f_{ok}}$$

Ekspander snopa



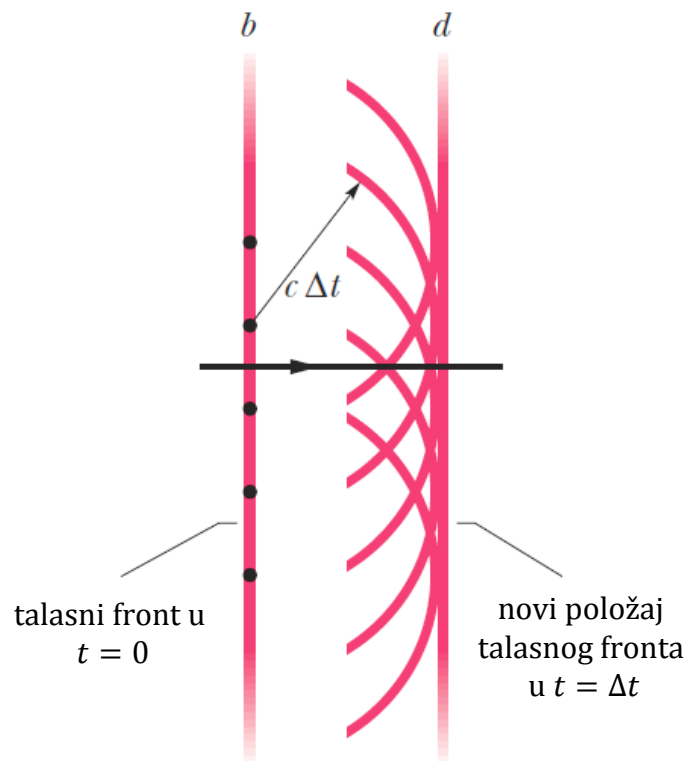
Primer: Ekspander snopa se sastoji od 2 sabirna sočiva žižnih daljina $f_1 = 20$ cm i $f_2 = 50$ cm na rastojanju $d = f_1 + f_2 = 70$ cm. Koliko puta se uveća prečnik snopa $\frac{W_f}{W_i}$?

Koliko treba da je rastojanje sočiva ukoliko je sočivo je prednje sočivo rasipno $f_1 = -20$ cm? Koliko je tada uvećanje prečnika snopa?

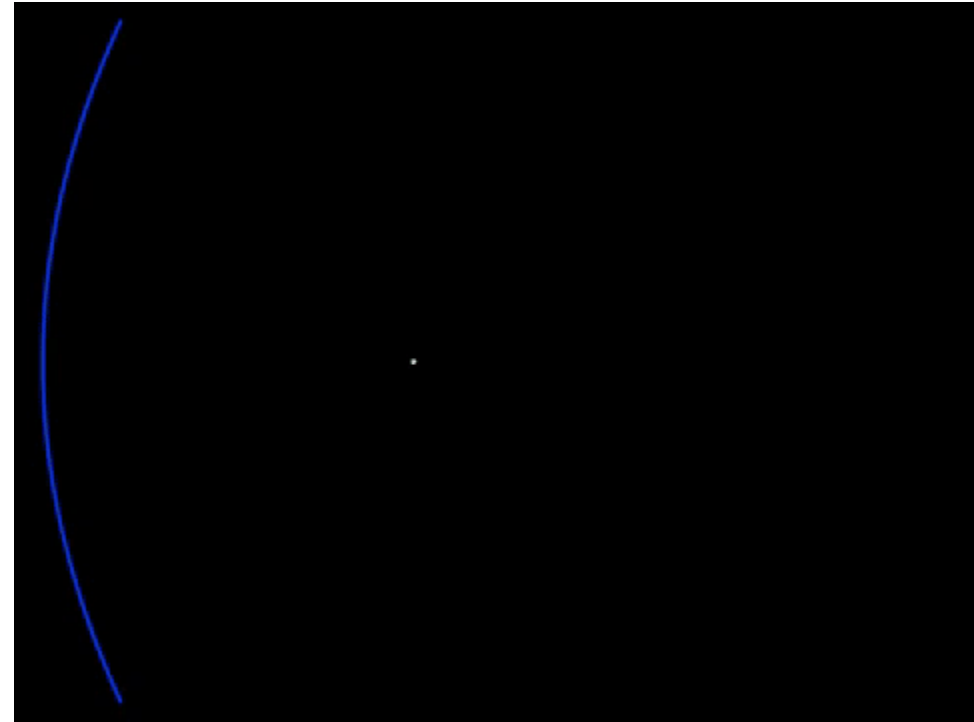


Talasna optika

Hajgensenov princip



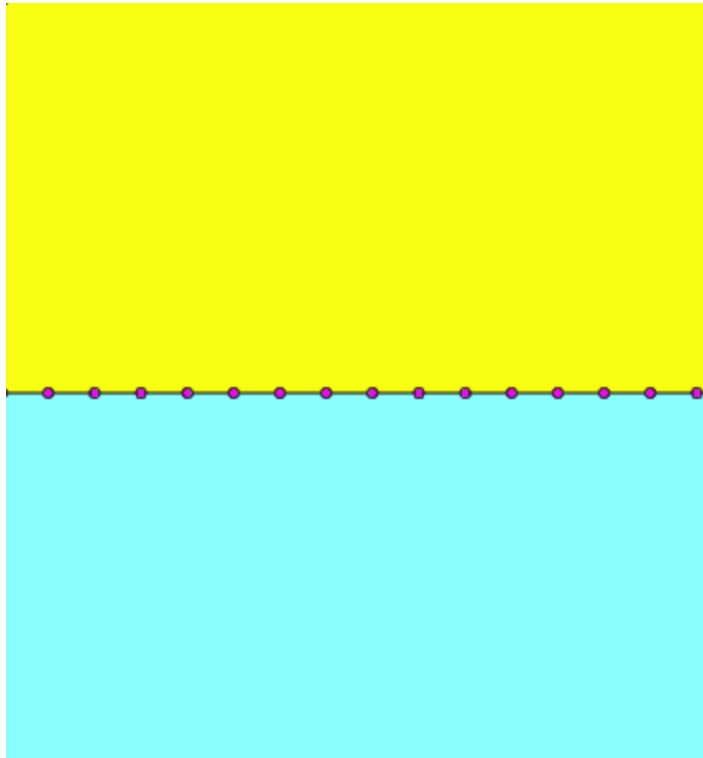
Talasni front ravanskog talasa



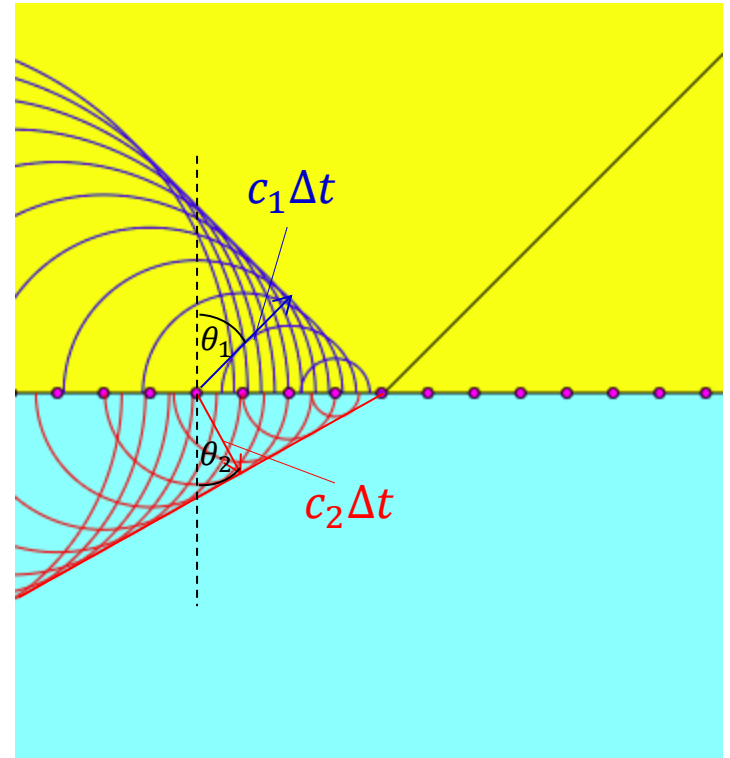
Tačkasti izvor stavljen u f ogledala – formira se ravanski talas

Svaka tačka na talasnom frontu u t postaje izvor sekundarnih sfernih talasa!
Obvojnica sekundarnih talas u $t + \Delta t$ daje formu i položaj talasnog fronta u $t + \Delta t$.

Zakon prelamanja iz Hajgensenovog principa



Konceptualni prikaz prelamanja preko Huygensenovog principa



$$\frac{c_1 \Delta t}{\cos(\pi/2 - \theta_1)} = \frac{c_2 \Delta t}{\cos(\pi/2 - \theta_2)}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{c_0/n_1}{c_0/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Interferencija ravnanskih talasa (iste polarizacije)

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r} + \varphi_1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r} + \varphi_2)$$

Rezultantno polje i intenzitet:

$$\vec{E}_{rez} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$I_{rez} = \varepsilon c \langle E_{rez}^2 \rangle_T = \varepsilon_0 c_0 n \langle E_{rez}^2 \rangle_T$$

$$\begin{aligned} E_{rez}^2 &= E_{01}^2 \sin^2(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1) + E_{02}^2 \sin^2(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 + \varphi_2) \\ &\quad + 2\vec{E}_{01} \vec{E}_{02} \sin(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1) \sin(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 + \varphi_2) \\ &= E_{01}^2 \sin^2(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1) + E_{02}^2 \sin^2(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 + \varphi_2) \\ &\quad + \vec{E}_{01} \vec{E}_{02} (\cos(\vec{k}_2 \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1 - \varphi_2) - \cos(2\omega t - \vec{k}_2 \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \varphi_1 + \varphi_2)) \end{aligned}$$

$$\langle \cos(2\omega t + \phi_i) \rangle_T = 0$$

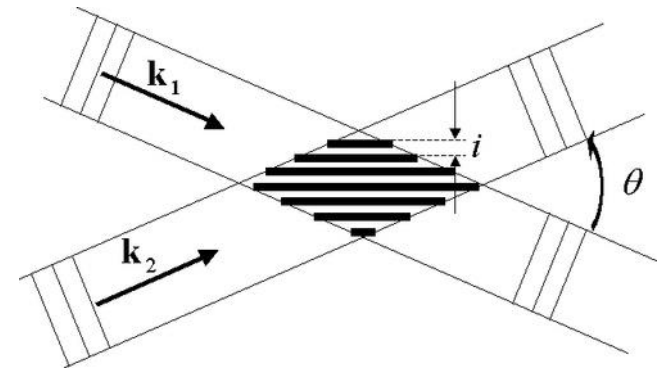
$$\langle \sin^2(\omega t + \phi_i) \rangle_T = 1/2$$

$$\text{TM (p ili } \perp\text{): } I_r = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

$$\delta = \vec{k}_2 \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \Delta\varphi$$

$$\text{TE (s ili } \parallel\text{): } I_r = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \cos \theta$$

$$\delta = \begin{cases} 2m\pi, & \text{max} \\ (2m-1)\pi, & \text{min} \end{cases}$$

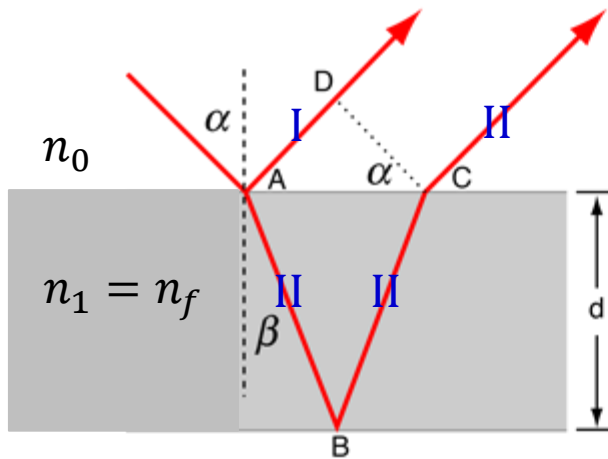


$$\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 = \frac{1}{2} (\cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos(\alpha_1 + \alpha_2))$$

Interferencija na tankim filmovima

Pri superpoziciji u normalnoj ravni koja sadrži duž \overline{CD} :
 $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = E_{01} \cdot E_{02}$

Iz vazduha: $n_0 < n_1$ ($\varphi_{01} = \pi$)



$n_2 = n_s$

$$\overline{AB} = \overline{BC} = d / \cos \beta$$

$$\overline{AC} = 2\overline{AB} \sin \beta$$

$$\overline{AD} = \overline{AC} \sin \alpha$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$k_i = n_i k_0$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda_0$$

Amplitudu određuje fazna razlika između snopova I i II:

$$\delta = \phi_I - \phi_{II}$$

$$\phi_I = \omega t - k_0 \overline{AD} + \varphi_0 + \varphi_{01}$$

$$\phi_{II} = \omega t - k(\overline{AB} + \overline{BC}) + \varphi_0 + \varphi_{12}$$

$$\delta = \vec{k}_2 \vec{r}_2 - \vec{k}_1 \vec{r}_1 + \Delta\varphi$$

Fazna razlika je posledica razlike u pređenim putevima i refleksije na razdvojnoj površi dve sredine:

$$\delta = k(\overline{AB} + \overline{BC}) - k_0 \overline{AD} + (\varphi_{01} - \varphi_{12})$$

$$\delta = 2n_f d k_0 \cos \beta + (\varphi_{01} - \varphi_{12}) = \begin{cases} 2m\pi, & \text{max} \\ (2m - 1)\pi, & \text{min} \end{cases}$$

Fazni pomak pri refleksiji na razdvojnoj površi dve sredine:

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} 0, & n_i > n_j \\ \pm\pi, & n_i < n_j \end{cases}$$

pri refleksiji od optički "gušću" fazni pomak je π

Primer: Opna sapunice i ulje na sloju vode

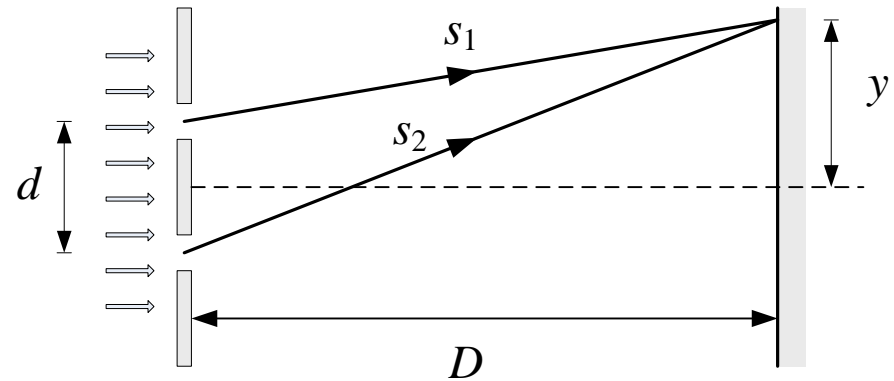
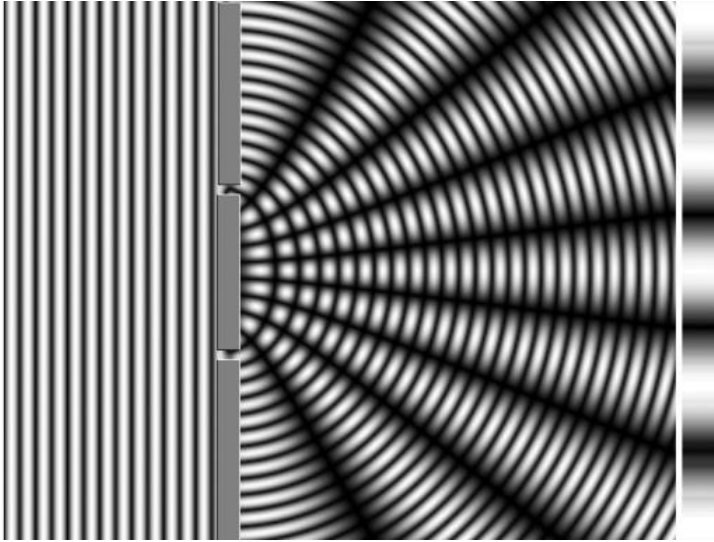


Opna sapunice



Ulje prosuto po vlažnom asfaltu

Youngov eksperiment



Fazna razlika između snopa 1 i 2:

$$\Delta\phi = k(s_2 - s_1)$$

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi d}{\lambda D} y = \begin{cases} 2m\pi, & \text{max} \\ (2m - 1)\pi, & \text{min} \end{cases}$$

$$y_m^{\text{max}} = \frac{m\lambda D}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$y_m^{\text{min}} = \frac{(2m - 1)\lambda D}{2d} \quad m = 1, 2, \dots$$

U centru max ($m = 0$)

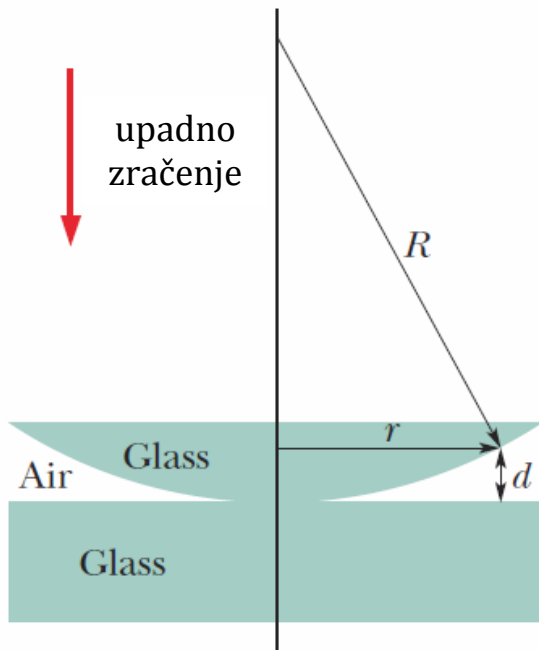
$$s_1^2 = D^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$s_2^2 = D^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2$$

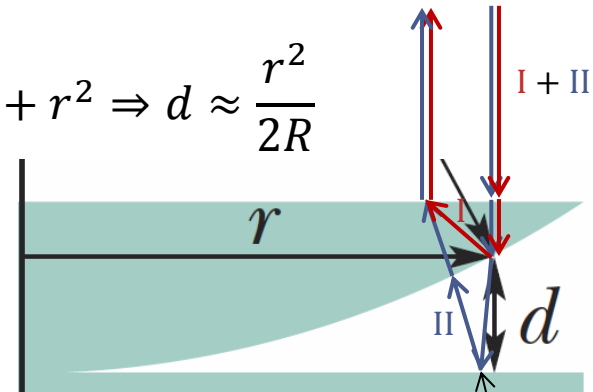
$$s_2^2 - s_1^2 = (s_2 - s_1)(s_2 + s_1) = 2yd$$

$$s_2 + s_1 \approx 2D \Rightarrow s_2 - s_1 \approx y \frac{d}{D}$$

Newtonovi prstenovi



$$R^2 = (R - d)^2 + r^2 \Rightarrow d \approx \frac{r^2}{2R}$$



$$\phi_I = \omega t + \varphi_0$$

$$\phi_{II} = \omega t - 2dk_0 + \varphi_0 - \pi$$

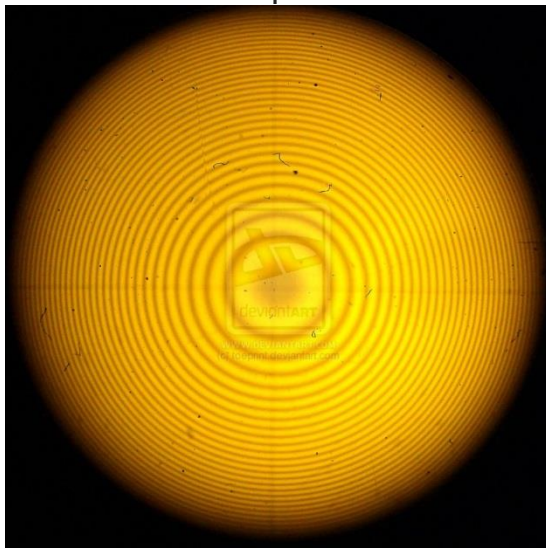
$$\delta = 2d \frac{2\pi}{\lambda} + \pi \approx \pi \left(1 + \frac{2r^2}{\lambda R} \right) = \begin{cases} 2m\pi, & \text{max} \\ (2m + 1)\pi, & \text{min} \end{cases}$$

$$r_m^{\text{max}} = \sqrt{\frac{2m - 1}{2} \lambda R}$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

$$r_m^{\text{min}} = \sqrt{m \lambda R}$$

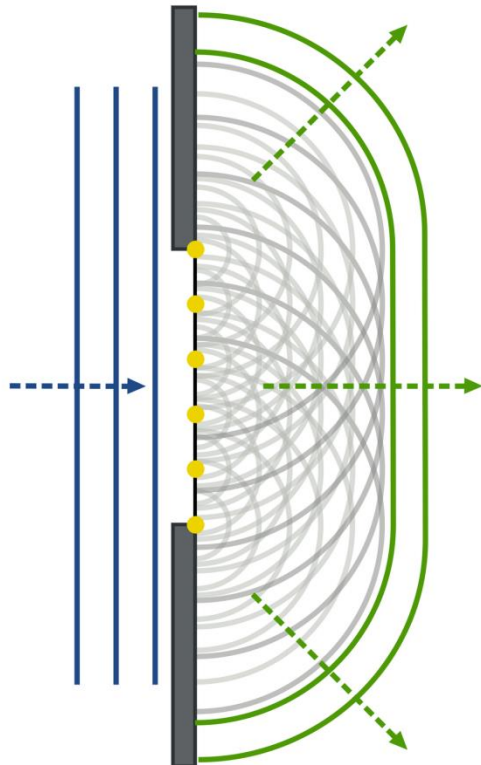
$m = 0$ centralni minimum



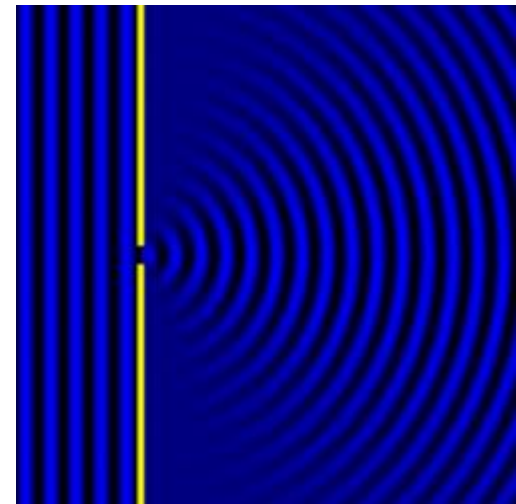
Difrakcija

Frenelova (blisko polje)

Fraunhoferova (daleko polje)

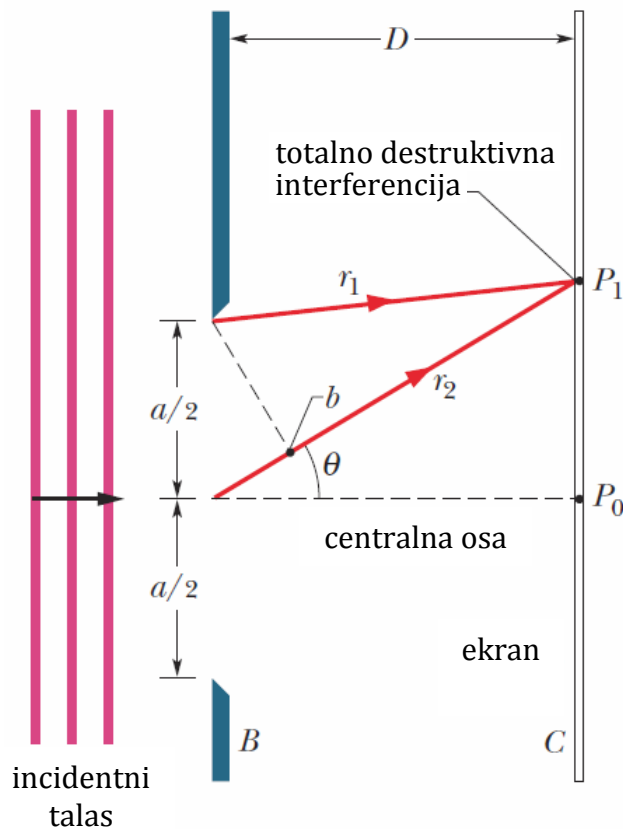


Huygensenov princip za konstruisanje talasnog fronta



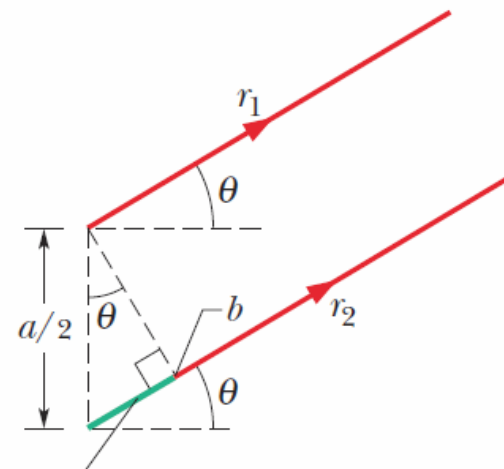
Raspodela intenziteta pri difrakciji na uskom otvoru (blisko i daleko polje)

Fraunhoferova difrakcija na jednom prorezu



Za određeni ugao θ u tački P_1 na ekranu je minimum

Kada je rastojanje otvora od ekrana $D \gg a$ snopovi r_1 i r_2 su približno paralelni za dati ugao posmatranja θ u odnosu na osu



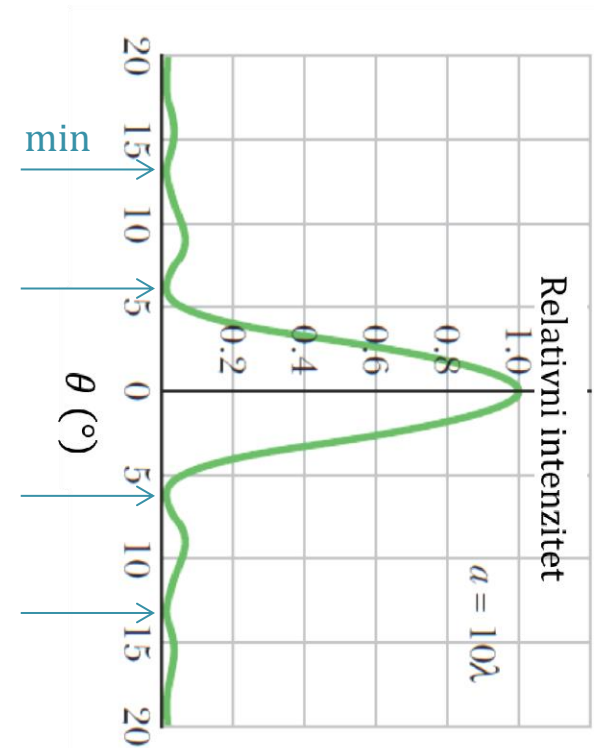
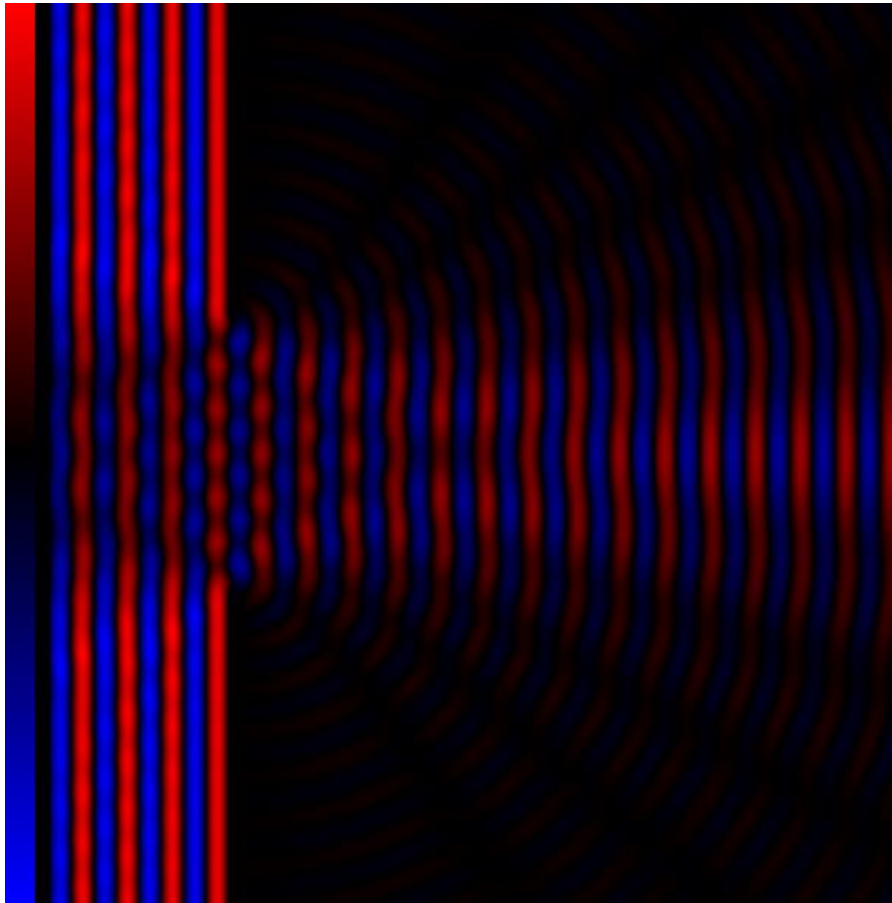
prvi minimum ako je $a/2 \sin \theta = \lambda/2$

$$\sin \theta_m^{\min} = \frac{m\lambda}{a} \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$m = 0$ centralni max.

Ostali maksimumi nisu simetrični u odnosu na minimume.

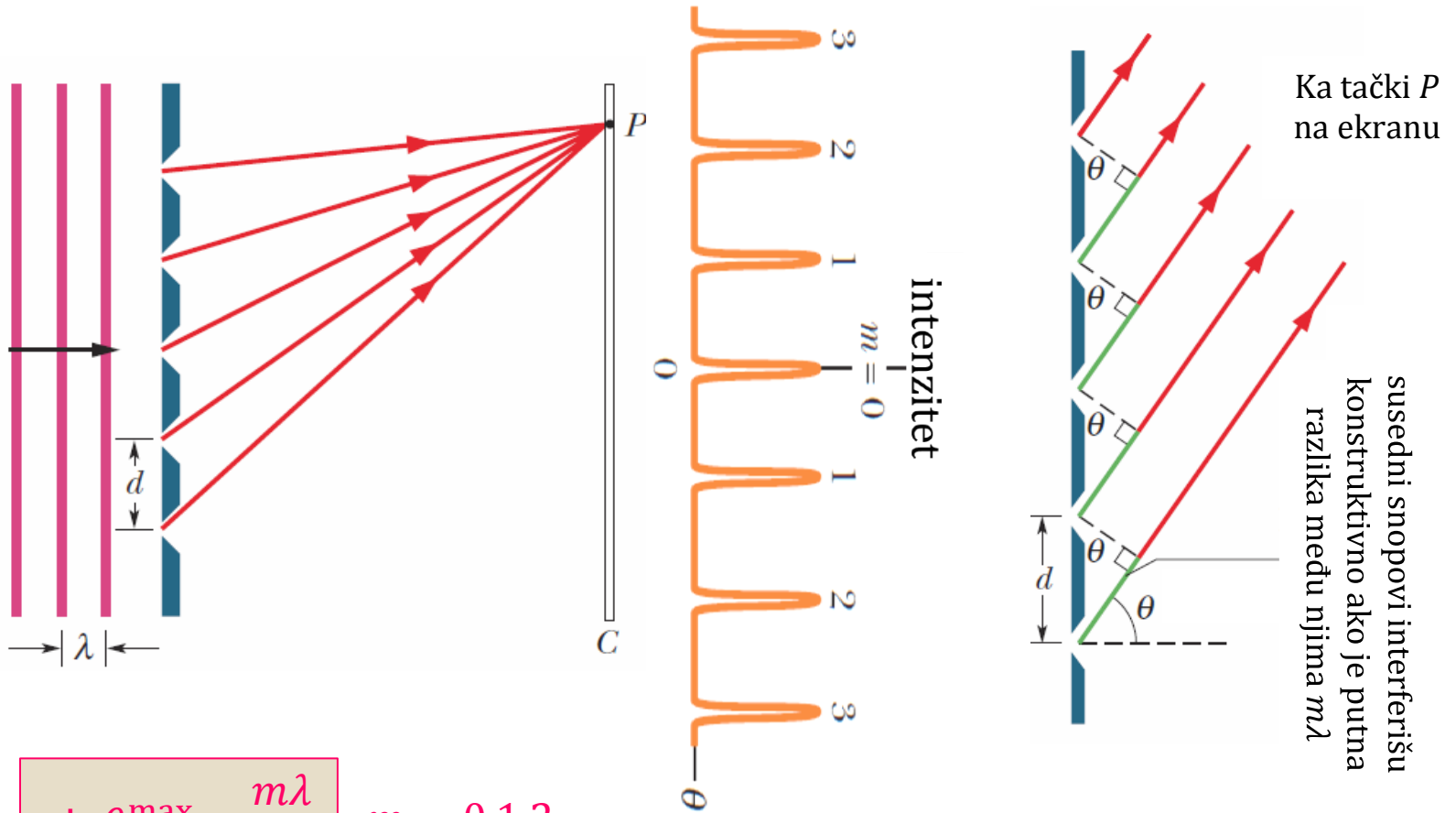
Fraunhoferova difrakcija na jednom prorezu: Intenzitet



$$I(\theta) = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

Difrakciona rešetka



$$\sin\theta_m^{\max} = \frac{m\lambda}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\sin\theta_m^{\min} = \frac{(2m - 1)\lambda}{2d} \quad m = 1, 2, \dots$$

$$N = \frac{1}{d[\text{mm}]} - \text{konstanta rešetke}$$

Primer: difrakciona rešetka

Difrakciona rešetka ima $N = 400 \frac{\text{zarezova}}{\text{mm}}$. Monohromatska svetlost talasne dužine $\lambda = 600 \text{ nm}$ pada upravno na rešetku. Koliki je broj svetlih pruga na ekranu?

Rešenje:

Najveći red maksimuma m_{max} je određen položajem $\theta_{m_{\text{max}}} < 90^\circ$.

$$d \sin \theta_{m_{\text{max}}} = m_{\text{max}} \lambda < d \cdot 1 \Rightarrow$$

$$m_{\text{max}} = \left[\frac{d}{\lambda} \right] = \left[\frac{1}{N\lambda} \right] = 4,$$

gde je m_{max} zaokružen na manju vrednost (*floor*).

Ukupan broj maksimuma je:

$$N_{\text{max}} = 2 \cdot m_{\text{max}} + 1 = 9.$$

Postoji centralni maksimum i po m_{max} maksimuma sa svake strane (iznad i ispod) centralnog maksimuma. Pojedine svetle pruge mogu da se ne "vide" za datu λ , ako se difrakcioni minimum za jedan prorez preklapa sa difrakcionim maksimumom za rešetku. Na primer, 4. red maksimuma dat sa $d \cdot \sin \theta = 4\lambda$ se ne vidi, ako je širina otvora a takva da ugao θ odgovara npr. prvom minimumu difrakcije na jednom prorezu $a \cdot \sin \theta = \lambda$, što je slučaj za $a = d/4 = 625 \text{ nm}$, pa je $N_{\text{max}} \approx 7$ (intenzitet 4. maksimuma rešetke je ≈ 0)!

Koliki je broj svetlih pruga na ekranu ako svetlost pada pod uglom

$\psi = 30^\circ$ u odnosu na normalu?

[Uputstvo: $d(\sin \psi + \sin \theta_m^{\text{max}}) = m\lambda$.]

Hvala na pažnji!

- Kraj 20. časa!