

# Valna (fizikalna) optika

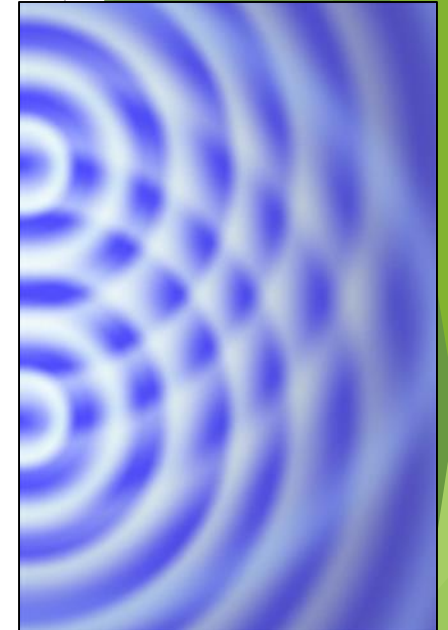


# Interferencija svjetlosti

- Za mehaničke valove vrijedi princip superpozicije - dobivamo konstruktivnu ili destruktivnu interferenciju u nekoj točki prostora.
- Interferencija svjetlosti?
- Zakon (geometrijske optike) nezavisnosti snopova kaže da snopovi ne utječu jedan na drugoga kad prolaze jedan kroz drugoga!!
- Ipak!! Svjetlosni valovi interferiraju, ali da bismo opazili interferenciju, valovi moraju biti koherentni.

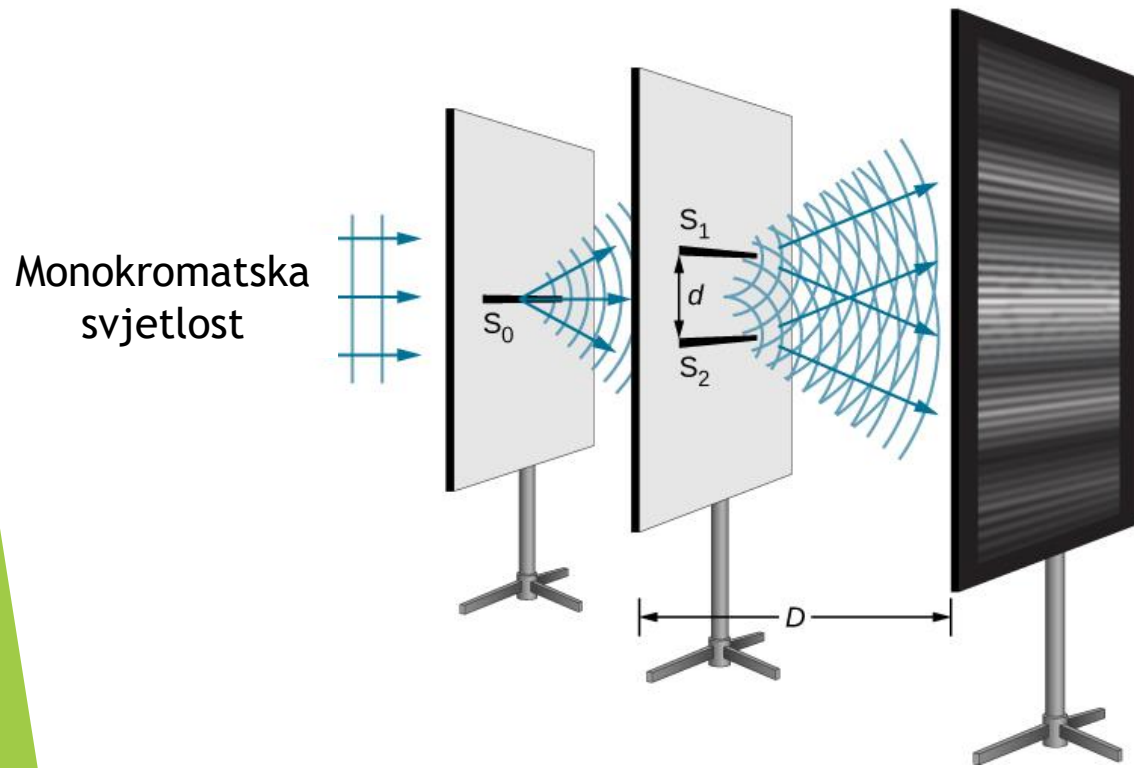
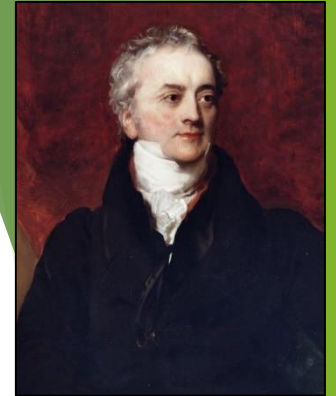
**Koherentni valovi** - imaju istu frekvenciju i u fazi su ili im je razlika u fazi uvijek konstantna (ne ovisi o vremenu).

- Dva različita izvora nikada ne emitiraju koherentne valove.
- Koherentne valove dobivamo (i interferenciju) kad iz jednog izvora napravimo više izvora.

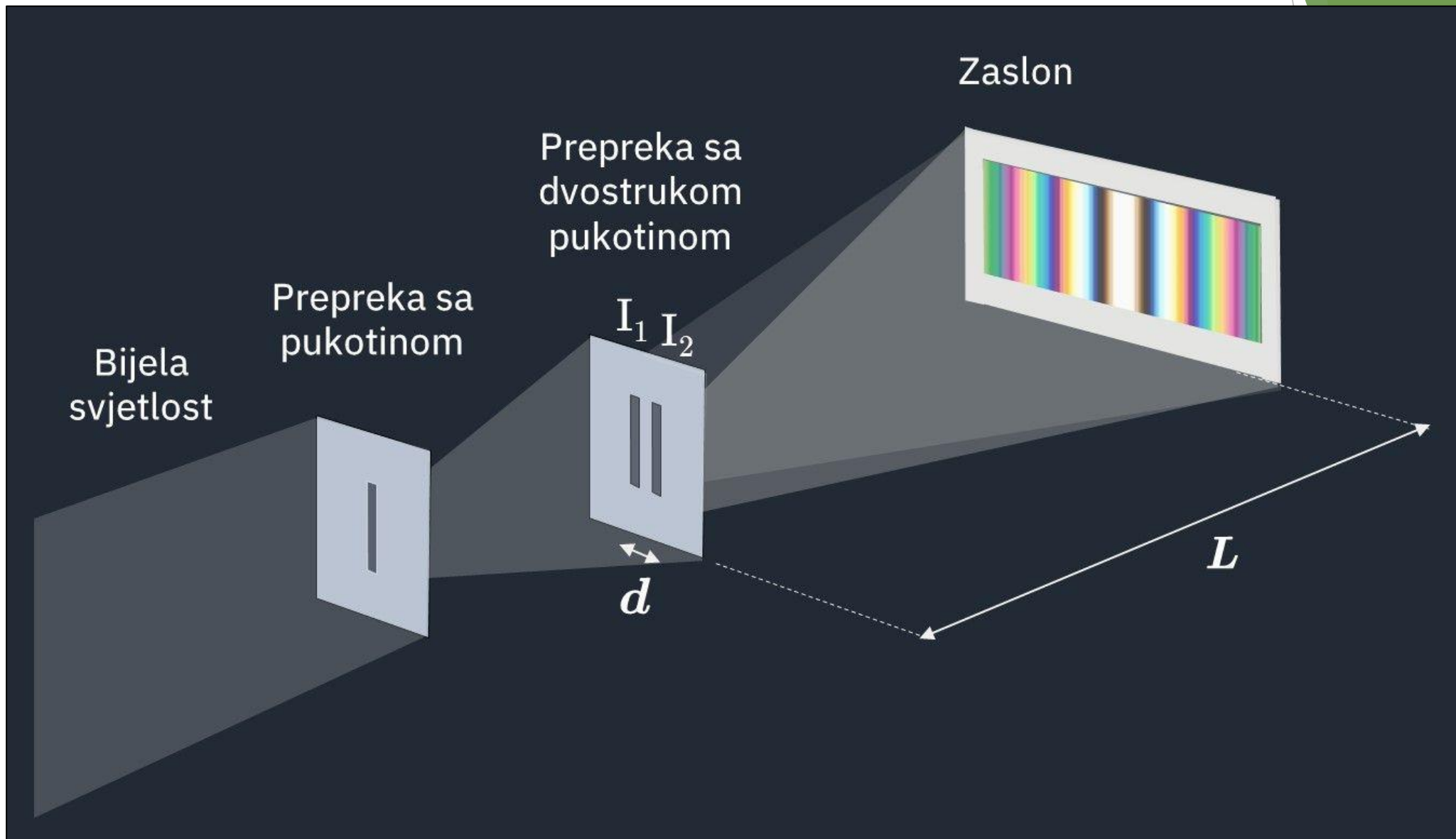


# Youngov pokus

- 1801. Thomas Young - opazio interferenciju svjetlosti iz dviju pukotina - slično interferenciji dva vala na vodi.

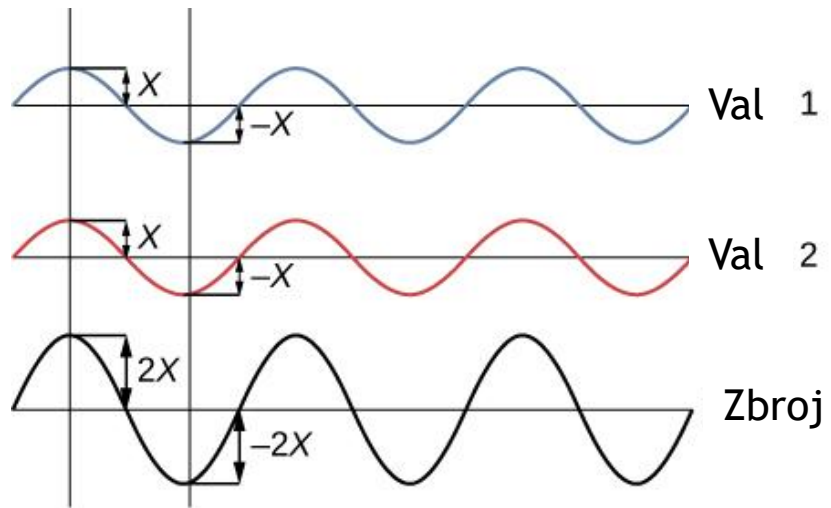
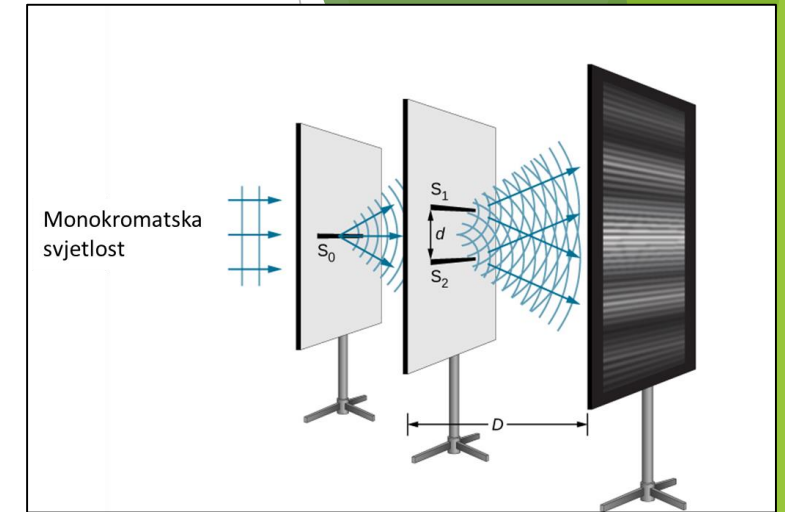


- Dvije uske pukotine  $S_1$  i  $S_2$  djeluju kao dva koherentna izvora svjetlosti.
- Interferencijski uzorak čine jasno vidljivi niz svijetlih i tamnih pruga.
- Svijetle pruge ukazuju na pojavu konstruktivne interferencije.
  - Tamne pruge rezultat su destruktivne interferencije.

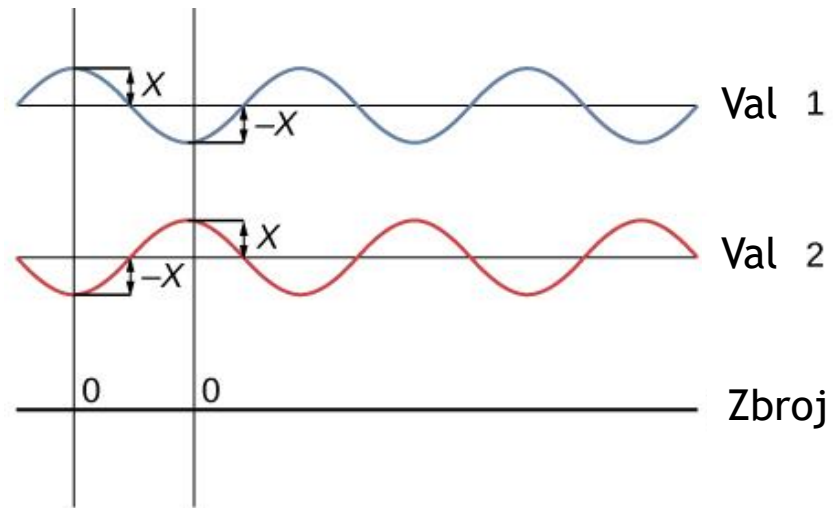


# Youngov pokus

- Iz pukotina  $S_1$  i  $S_2$  izlaze dva koherentna vala jednake amplitude, frekvencije i faze.
- Do zastora valovi prelaze različite putove.
- U svakoj točki zastora se elektromagnetski valovi iz obje pukotine (izvora) zbrajaju i daju interferencijsku sliku.

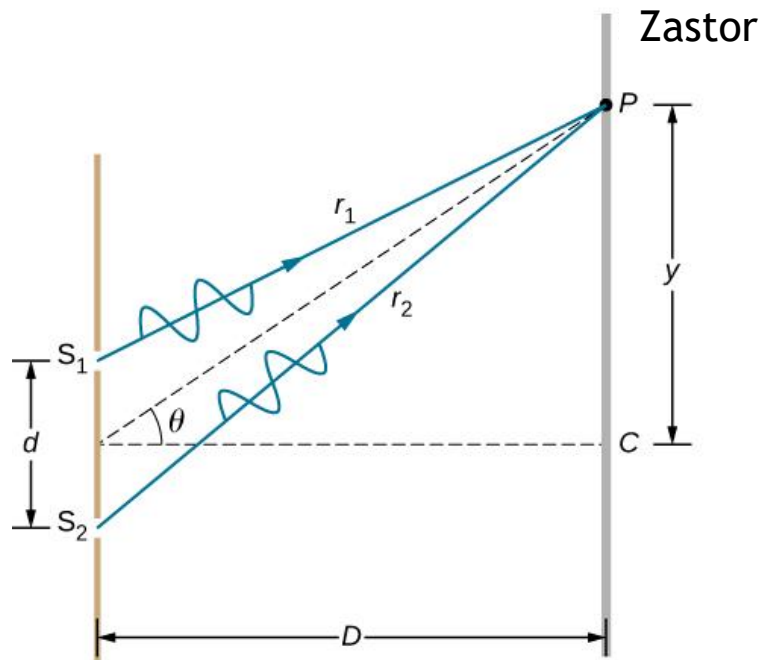


Konstruktivna  
interferencija

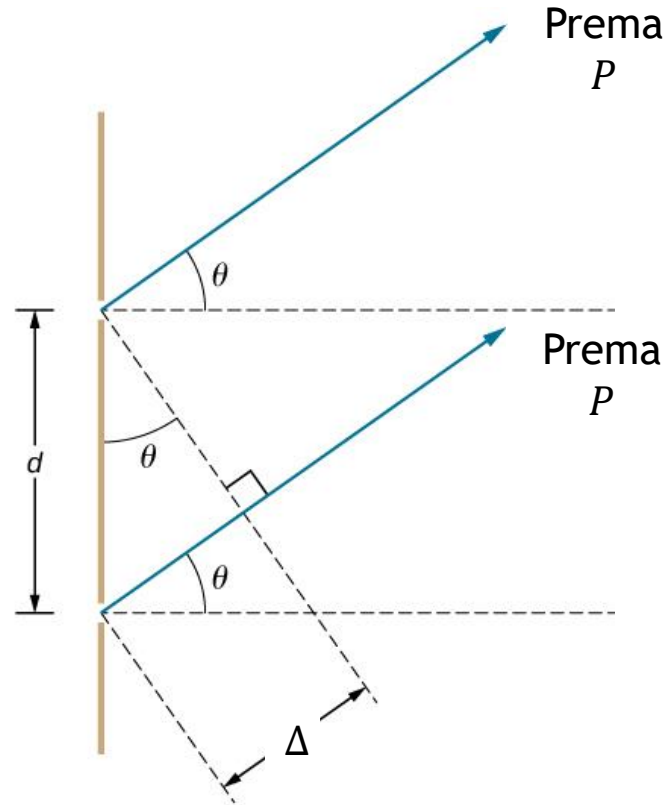


Destruktivna  
interferencija

# Youngov pokus



Udaljenost od pukotina do zastora  $D$  puno je veća od razmaka između pukotina  $d$  ... (mali kut  $\theta$ )



... pa se zrake mogu smatrati paralelnima i razlika u hodu je:

$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

$$\varphi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} = kd \sin \theta$$

Razlika u fazi

# Simulacija: Youngov pokus

The simulation interface shows a light source on the left labeled "Light Generator" with a green dot. A double slit is positioned in the center, with a distance of 500 nm between the slits. The light passing through the slits creates an interference pattern of purple waves on a screen to the right. A vertical scale on the screen shows a central maximum at 2475.4 nm. The time scale is set to  $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ .

Control panels on the right include:

- Frequency: A color spectrum slider with a purple marker.
- Amplitude: A slider from 0 to max.
- Graph:  Graph,  Screen,  Intensity.
- Two Slits: A dropdown menu.
- Slit Width: A slider from 200 nm to 1600 nm, currently at 200 nm.
- Slit Separation: A slider from 400 nm to 3200 nm, currently at 800 nm.

At the bottom, there are playback controls (Pause, Play) and speed settings (Normal, Slow). A PhET logo is also present.

Wave Interference



PhET

# Youngov pokus

Max:  $d \sin \theta = m\lambda$

Min:  $d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$

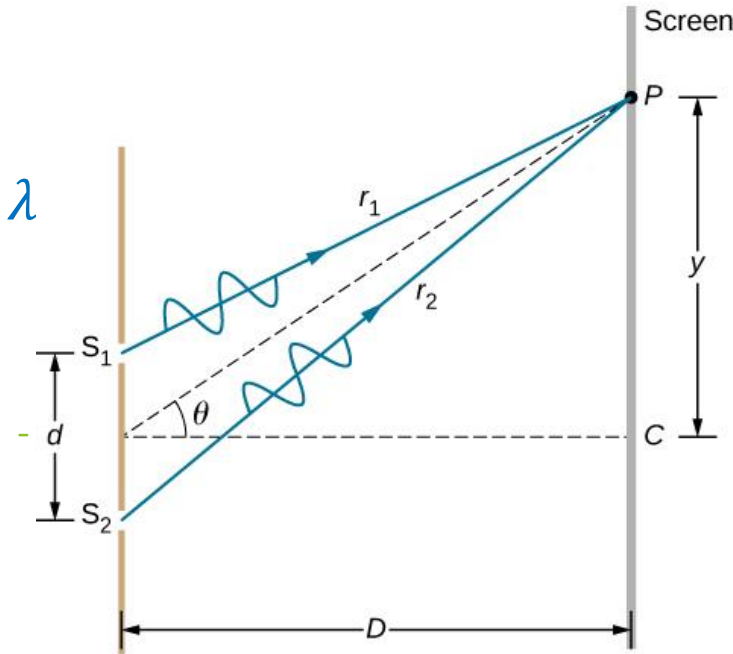
$D \gg d \rightarrow \theta$  mali  
 $\rightarrow \tan \theta \approx \sin \theta$

$y_m = D \tan \theta = D \sin \theta$

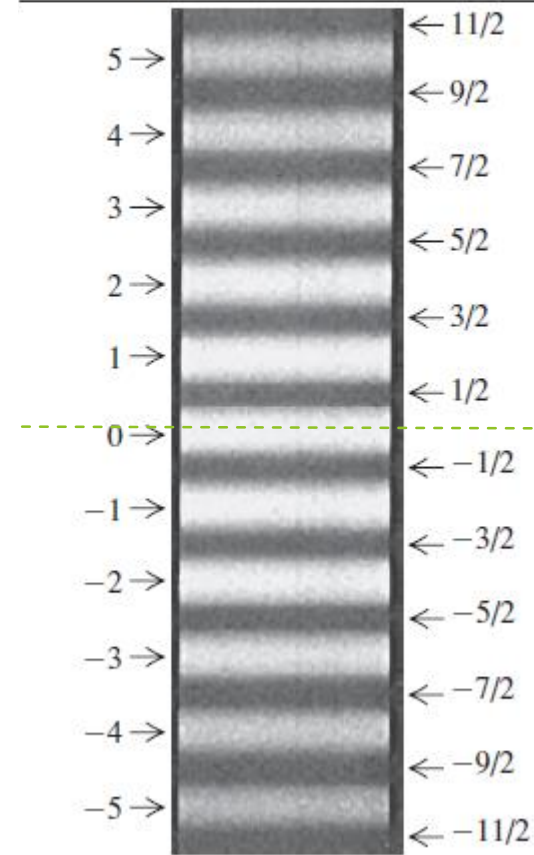
$y_m = D \frac{m\lambda}{d}$



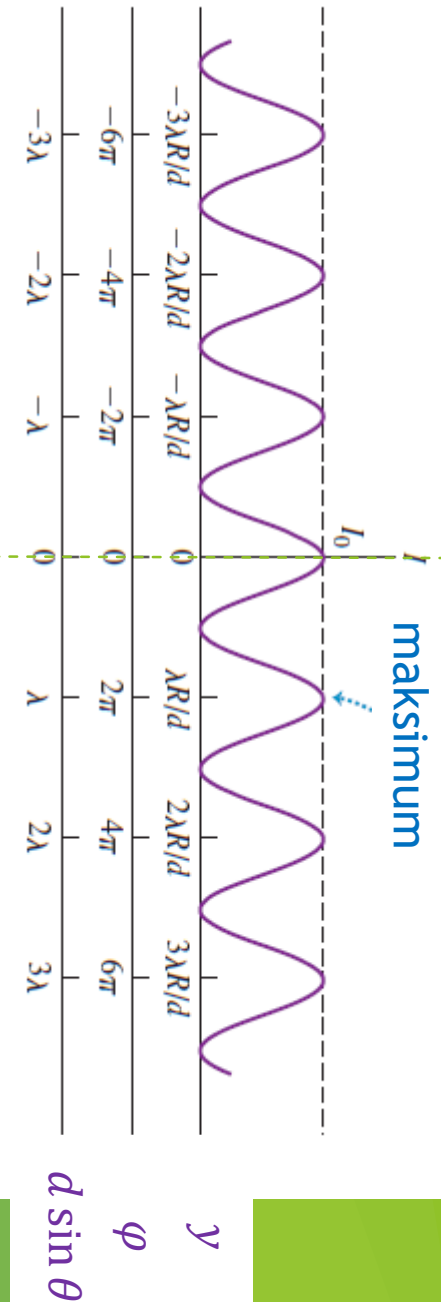
Možemo direktno izmjeriti  $\lambda$



$m$  konstruktivna interferencija  
 $m + 1/2$  destruktivna interferencija



Niz svijetlih i tamnih pruga interferencije na zastoru.



# Youngov pokus

Električno polje valova iz izvora  $S_1$  i  $S_2$ :  $E_1 = E_0 \cos(kr_1 - \omega t)$  i  $E_2 = E_0 \cos(kr_2 - \omega t)$

Zbrajamo u točki P, rezultatno titranje:  $E = E_1 + E_2 = E_0[\cos(kr_1 - \omega t) + \cos(kr_2 - \omega t)]$

$$E = 2E_0 \cos \frac{k(r_1 - r_2)}{2} \cos \left[ k \frac{r_1 + r_2}{2} - \omega t \right]$$

Amplituda  
titranja

Opis harmoničkog titranja u P

Intenzitet svjetlosti u P:

Razlika u fazi

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} (\text{amplituda električnog polja})^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} 4E_0^2 \cos^2 \frac{k(r_1 - r_2)}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} 4E_0^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

Intenzitet pojedinačnog izvora u P:

$$I_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2$$



Ukupni intenzitet u P:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

# Youngov pokus

Ukupni intenzitet u P:  $I = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$

$$\varphi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} \rightarrow I = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)$$

Maksimum intenziteta - svijetla pruga

$$\cos^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) = 1$$

$$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta = m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$d \sin \theta = m\lambda$$

Minimum intenziteta - tamna pruga

$$\cos^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right) = 0$$

$$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta = \frac{\pi}{2} + m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$d \sin \theta = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

$m$  - red interferencije

# Optička razlika putova

Promatrali smo interferenciju zraka svjetlosti koje su putovale kroz zrak,  $n = 1$ .

Razlika u fazi ovisila je o geometrijskoj razlici hoda (puta) zraka:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$

Ako se sad u točki P sastaju dva vala od kojih prvi od izvora dolazi sredstvom indeksa loma  $n_1$ , a drugi sredstvom indeksa loma  $n_2$ , njihova razlika u fazi je:

$$\varphi = \omega \left( t - \frac{r_1}{v_1} \right) - \omega \left( t - \frac{r_2}{v_2} \right) = \omega \left( \frac{r_2}{v_2} - \frac{r_1}{v_1} \right)$$

$$v_1 = \frac{c}{n_1}; v_2 = \frac{c}{n_2}$$



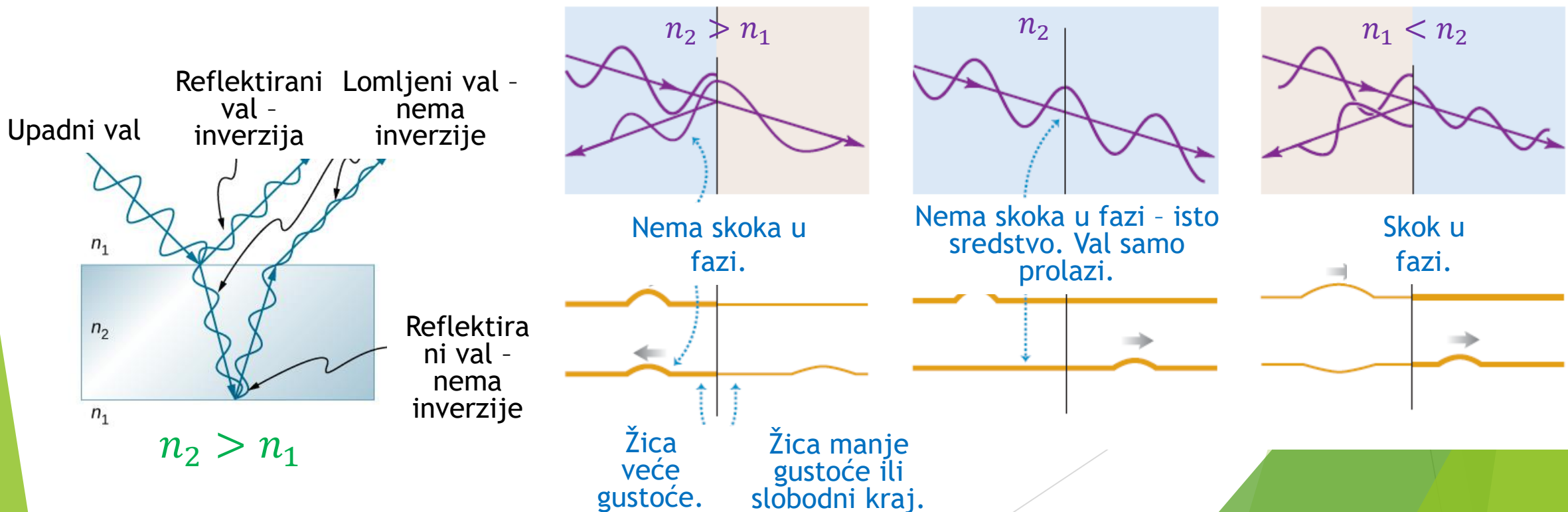
$$\varphi = \frac{\omega}{c} (n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$$

Optička razlika putova

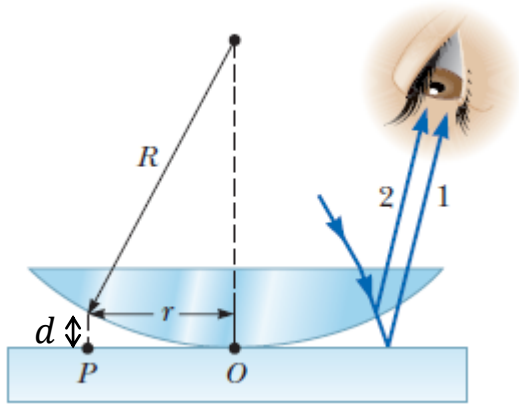
$$n_2 r_2 - n_1 r_1 = \delta$$

# Refleksija svjetlosti na granici sredstava

- Kao i kod mehaničkih valova, prilikom refleksije svjetlosti može doći do **skoka u fazi za  $180^\circ$  ( $\pi$  radijana)** odnosno razlike u prijeđenom putu za  $\lambda/2$ . To se dešava na optički gušćem sredstvu (veći indeks loma). → Inverzija vala: brijeg se vraća kao dol...
- Za svjetlost su bitni indeksi loma sredstava (kod mehaničkih valova to je bila linearna gustoća sredstva).



# Newtonovi kolobari



Geometrijska razlika u hodu zraka 1 i 2:

$$\Delta = 2d \quad \rightarrow \quad \delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

$$(R - d)^2 + r^2 = R^2$$

$$R^2 - 2Rd + d^2 + r^2 = R^2$$

$$d \ll R \rightarrow d^2 \text{ zanemarimo}$$

$$\delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

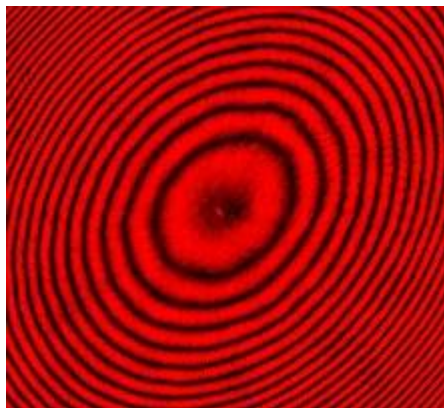
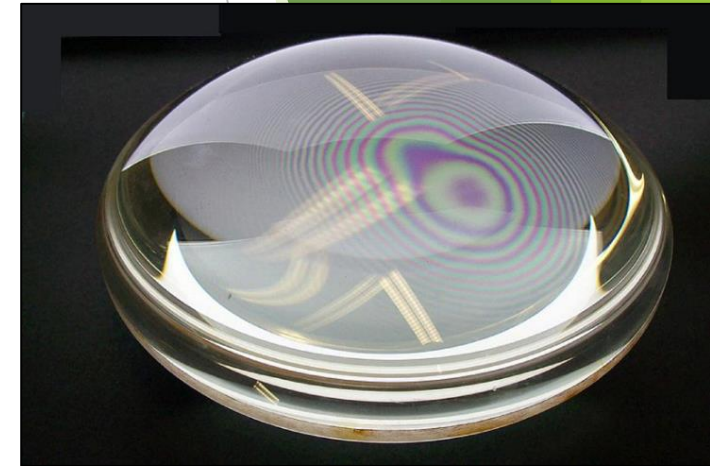
$$\text{Max: } \delta = m\lambda \quad \rightarrow \quad r_m = \sqrt{R(2m - 1) \frac{\lambda}{2}}$$

$$\text{Min: } \delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \rightarrow \quad r_m = \sqrt{mR\lambda}$$

$m = 0, 1, 2, 3 \dots$

Optička razlika u hodu:

Bijela svjetlost:

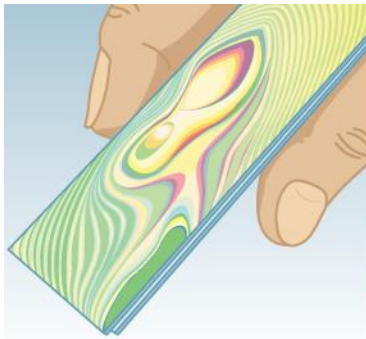


Polumjer m-tog svijetlog kolobara

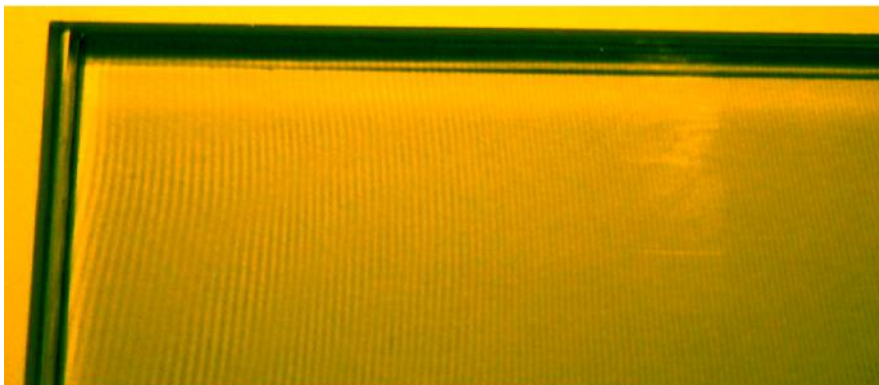
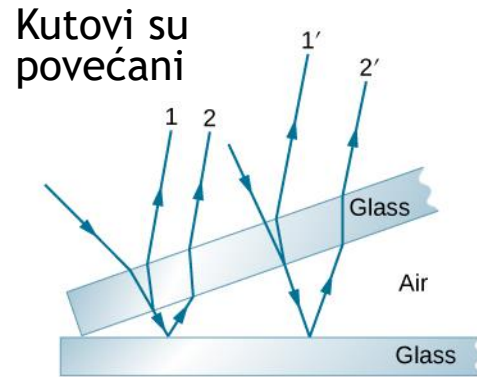
Polumjer m-tog tamnog kolobara

# Interferencija - primjeri...

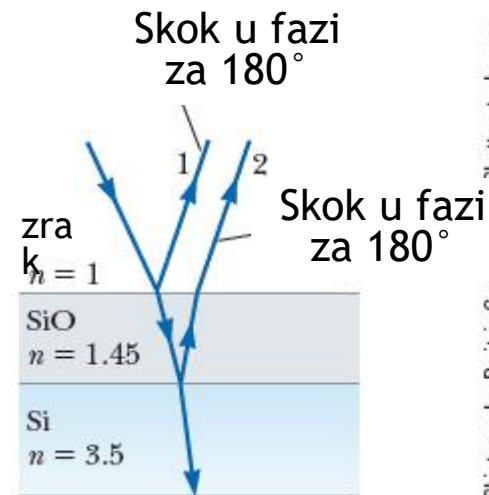
## Optički klin



Bijela svjetlost



Monokromatska svjetlost



Shutterstock.com  
Chisto prudov Dmitriy Ger



Tanki filmovi - antirefleksivni premazi.

# Simulacija: Difrakcija (ogib)

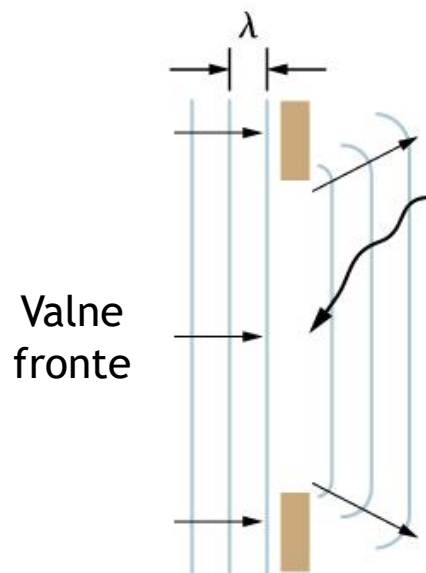
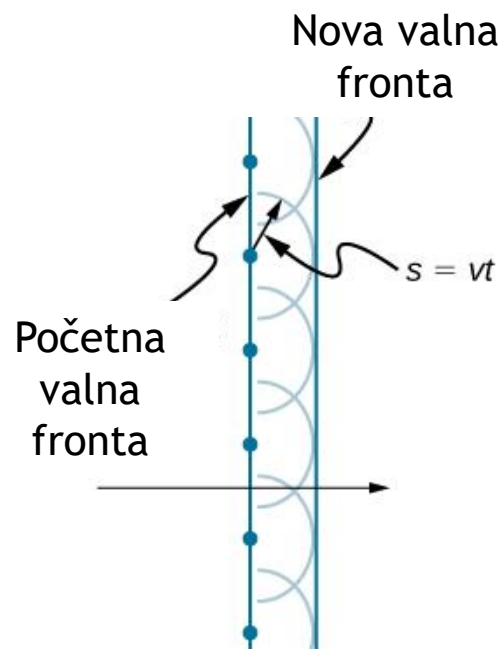
The simulation interface includes a light source icon with a red dot, a wavelength control panel showing 511 nm with a color spectrum, and a vertical toolbar with icons for different aperture shapes. Two experimental setups are shown: one with a 0.1 mm aperture and a screen, and another with a 10 mm aperture and a screen. A control panel at the bottom features sliders for Diameter (0.04 to 0.40 mm) and Eccentricity (0.00 to 0.99), a refresh button, and a navigation bar with icons for Waves, Interference, Slits, and Diffraction.

# Ogib (difrakcija) svjetlosti

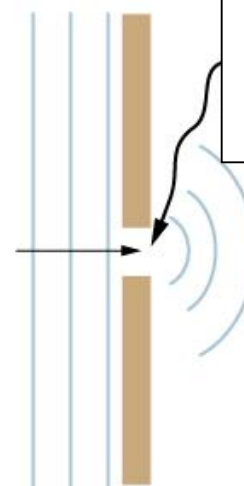
- Ulaženje valova u područje sjene.
- Lako se opaža kod valova na vodi ili zvučnih valova - dimenzije prepreke ili pukotine su reda veličine valne duljine (1m)



Huygensov princip - Svaka točka na valnoj fronti izvor je novog vala koji putuje brzinom početnog vala. Valna fronta je envelope valnih fronti svih tih novih valova, tj. tangenta na sve njih.



Velika pukotina u odnosu na valnu duljinu. Ne vidi se ogib.

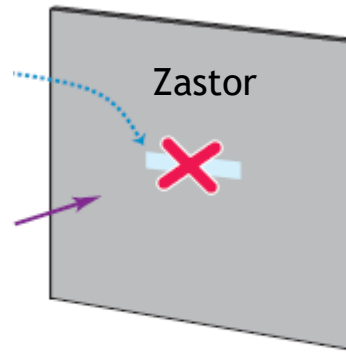
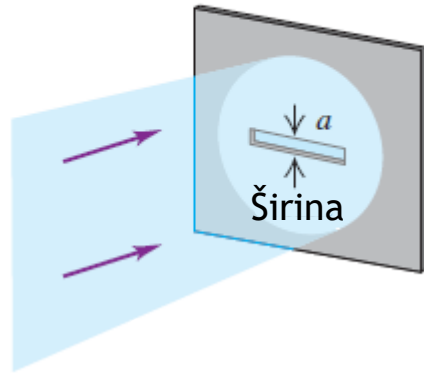


Pukotina reda veličine valne duljine. Vidi se ogib.

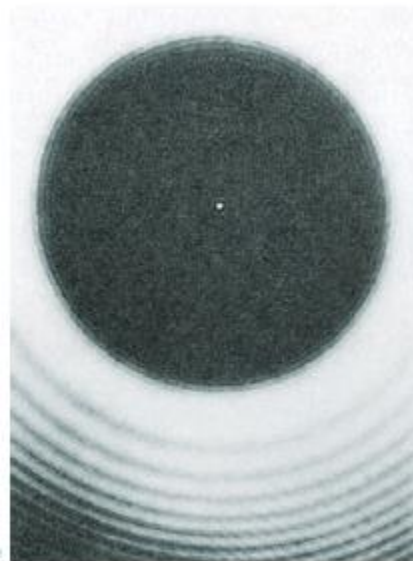
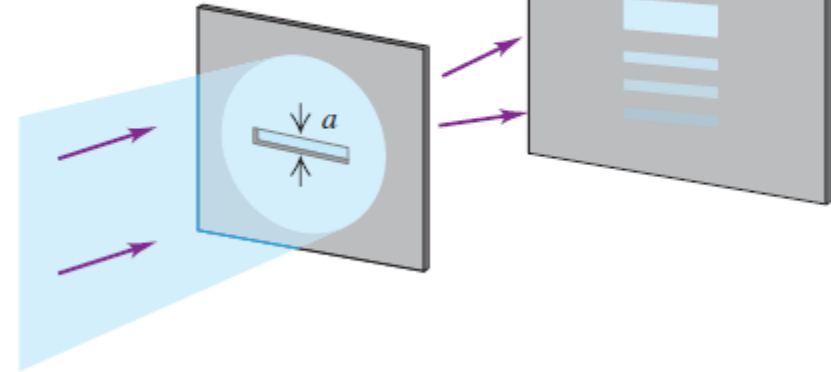
# Difrakcija svjetlosti

Predviđanje geometrijske optike: jedna svjetla „vrpca” iste veličine kao i pukotina.

Paralelni snop monokromatskih zraka

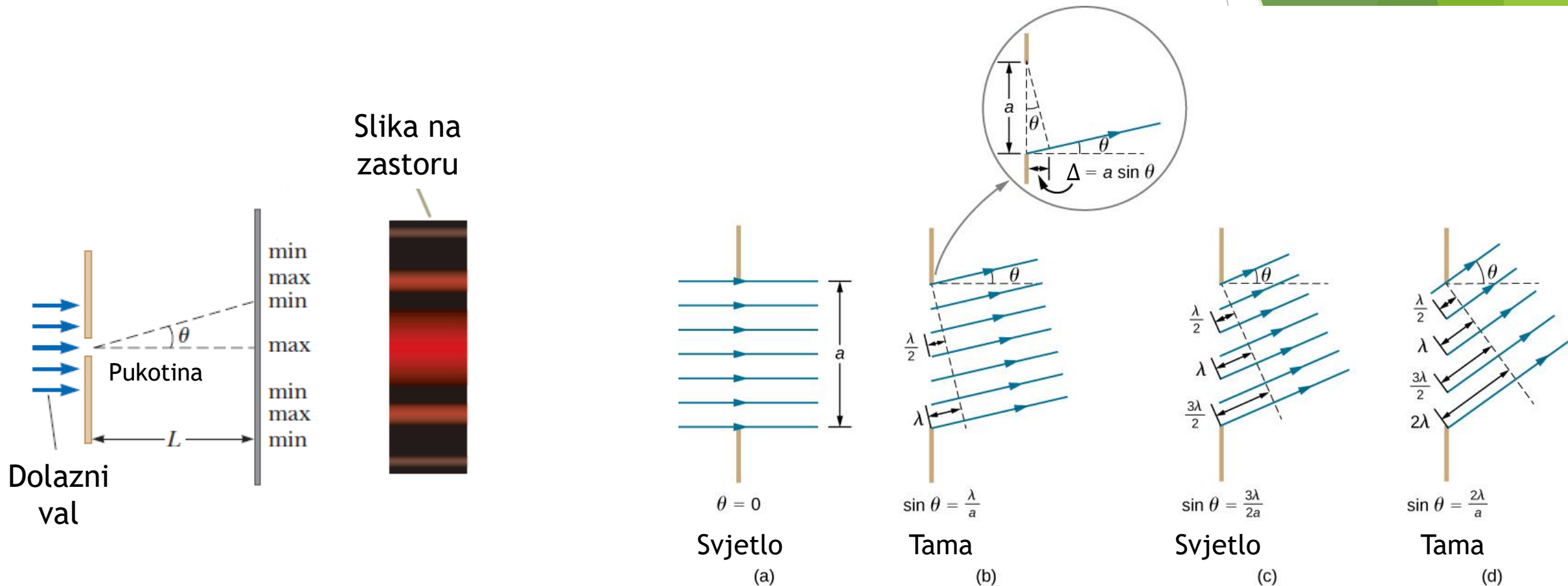


Što se stvarno dobije: difrakcijska slika - niz interferentnih pruga.



# Fraunhoferova difrakcija na jednoj pukotini

- Izvor i zastor su daleko od pukotine - ravne valne fronte i paralelne zrake (možemo postići pomoću sustava dviju konvergentnih leća).



Ovisno o kutu upada svjetlosti na zastoru vidimo svijetlu ili tamnu prugu.

# Fraunhoferova difrakcija na jednoj pukotini

Čitavu širinu pukotine podijelimo u tanke pruge širine  $dx$  - svaka pruga postaje izvor novog vala. Svi valovi doprinose ukupnom intenzitetu u nekoj dalekoj točki P. Doprinosi imaju različite faze.

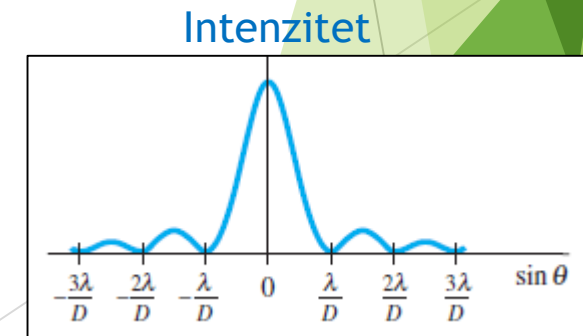
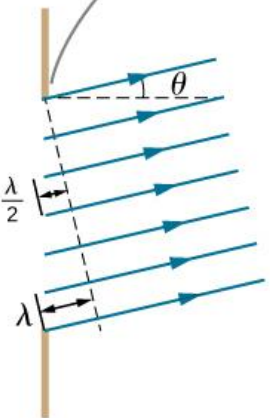
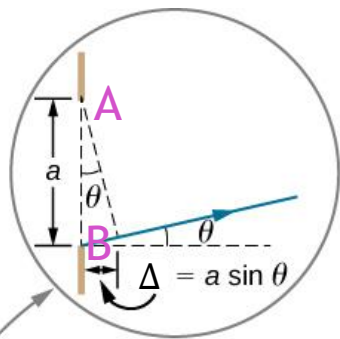
- Razlika u fazi krajnjih točaka pukotine (A i B):

$$\varphi = ka \sin \theta$$

- Rezultantno električno polje u točki P dobivamo zbrajanjem električnog polja svih valova.
- Intenzitet svjetlosti proporcionalan je kvadratu amplitude ukupnog električnog polja:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left( \frac{ka \sin \theta}{2} \right)}{\left( \frac{ka \sin \theta}{2} \right)^2}$$

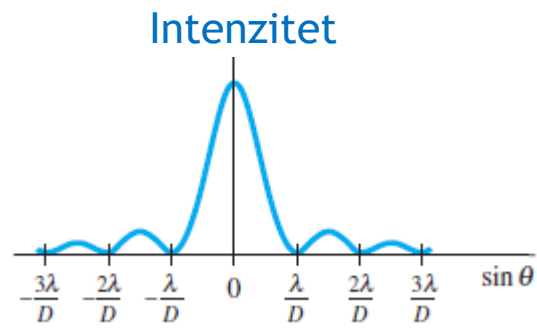
Intenzitet središnjeg maksimuma, za  $\theta = 0$ .



# Fraunhoferova difrakcija na jednoj pukotini

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left( \frac{ka \sin \theta}{2} \right)}{\left( \frac{ka \sin \theta}{2} \right)^2}$$

Intenzitet središnjeg maksimuma, za  $\theta = 0$ .



$$y = \frac{ka \sin \theta}{2} = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \rightarrow I = I_0 \frac{\sin^2 y}{y^2}$$

- Za  $\theta = 0$ :  $y = 0$ ,  $\sin y = 0 \rightarrow I = I_0$  središnji maksimum
- Minimume imamo uvijek kad je  $\sin y = 0$  (osim za  $y = 0$ ):

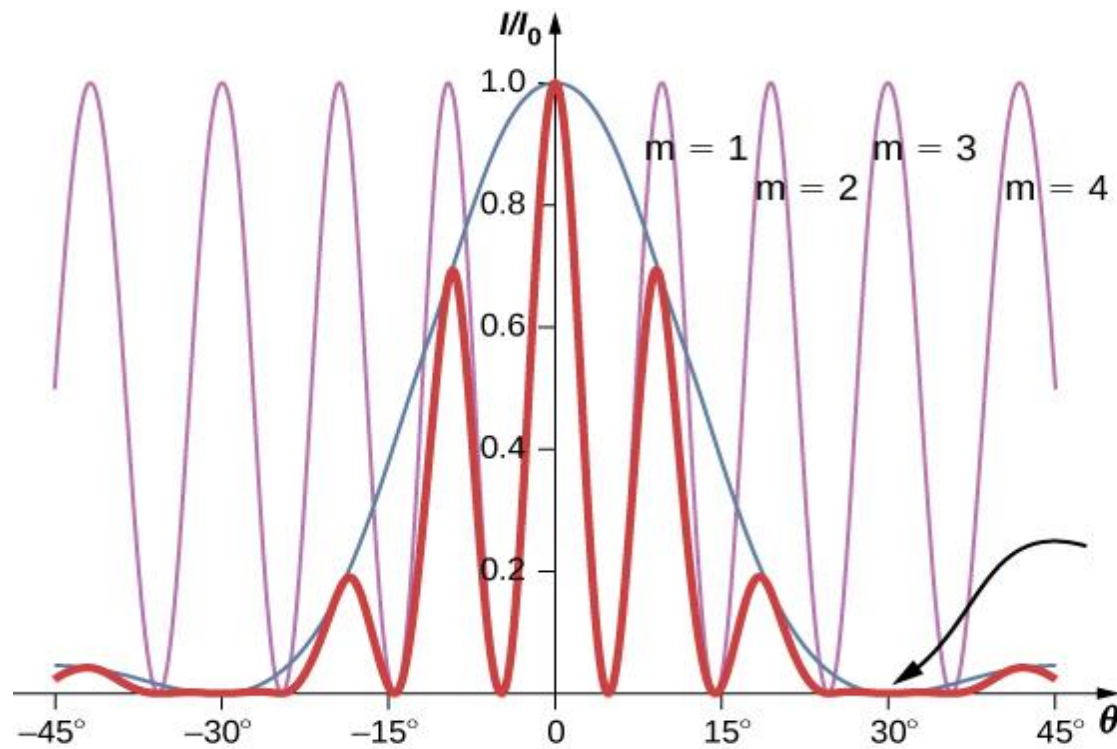
$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{a} \quad n = \pm 1, \pm 2 \dots$$

- Svaka svjetla pruga nalazi se otprilike na polovici udaljenosti između dvije tamne pruge.
- Centralna svjetla pruga je dva puta šira od širine sekundarnog maksimuma.

**!** Različito od interferencije na dvije pukotine.

# Fraunhoferova difrakcija na dvije pukotine

- Kombinacija difrakcije na jednoj pukotini širine  $a$  i interferencije dvaju pukotina razmaknutih za  $d$ .



— Interferencija

— Difrakcija

— Zajedno

$$a = 2\lambda$$

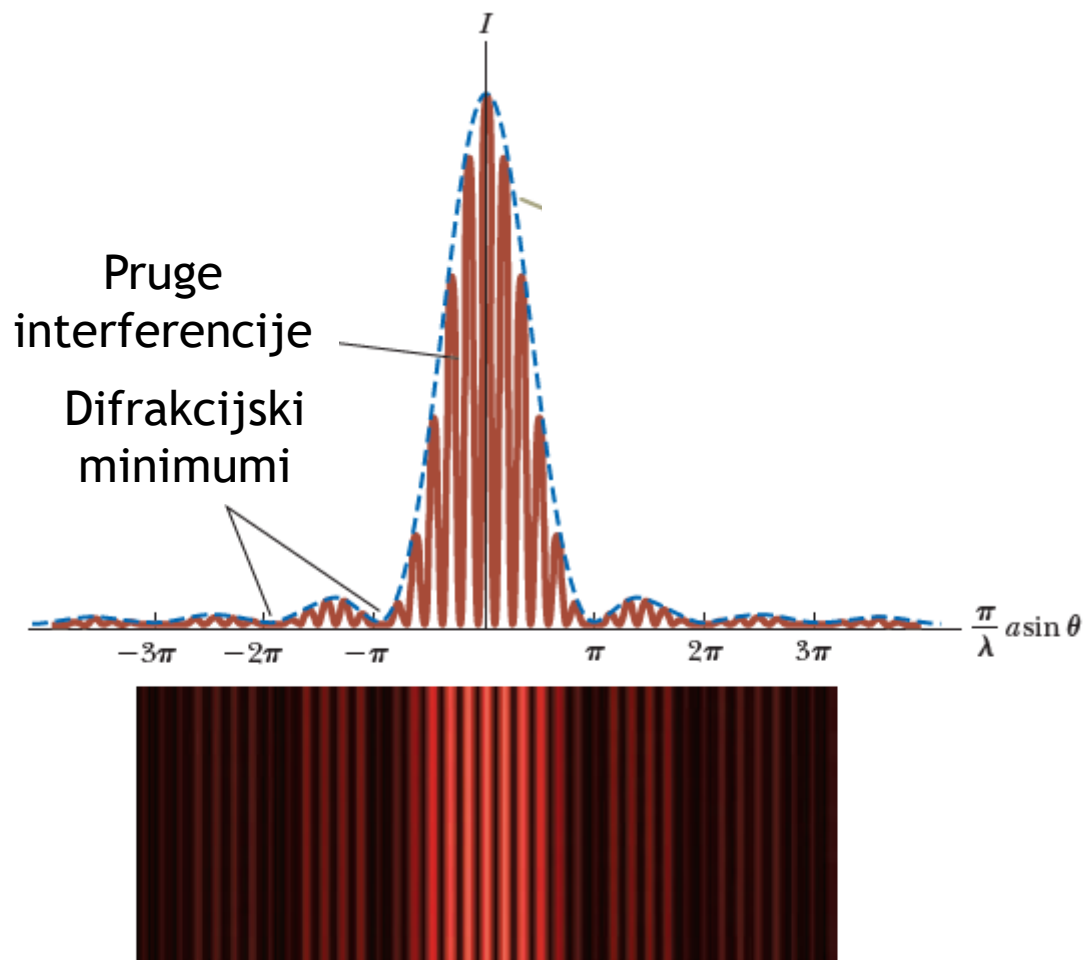
$$d = 6\lambda$$

Nedostaju maksimumi  
interferencije na mjestima gdje su  
minimumi od difrakcije:

$$m = 3 = d/a$$

# Fraunhoferova difrakcija na dvije pukotine

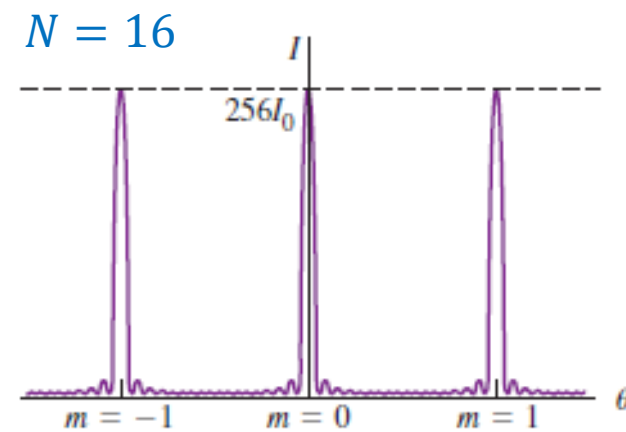
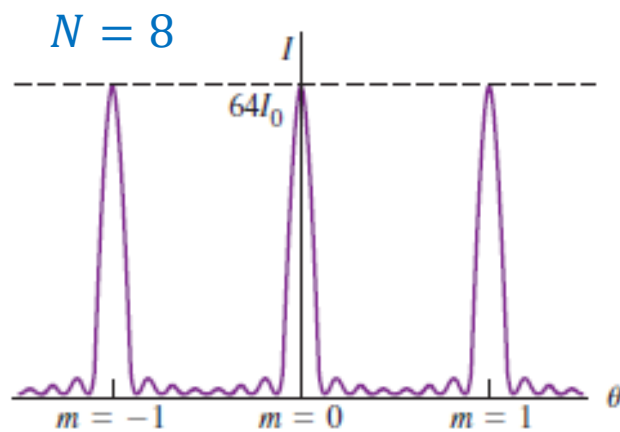
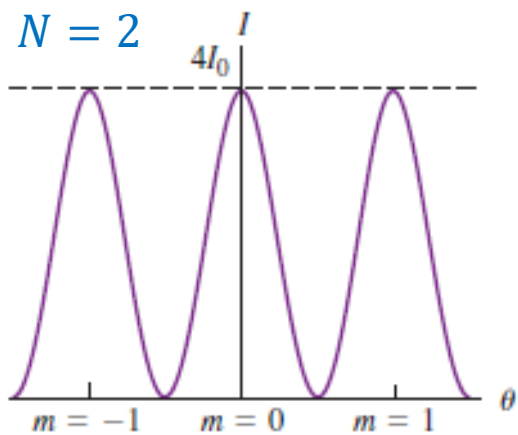
- Kombinacija difrakcije na jednoj pukotini širine  $a$  i interferencije dvaju pukotina razmaknutih za  $d$ .



- Kako se  $\frac{a}{\lambda}$  povećava, središnji maksimum postaje sve uži, ogibna slika postaje sve manje izražena.
- Za  $a \gg \lambda$ , ne vidi se ogib, samo slika pukotine.

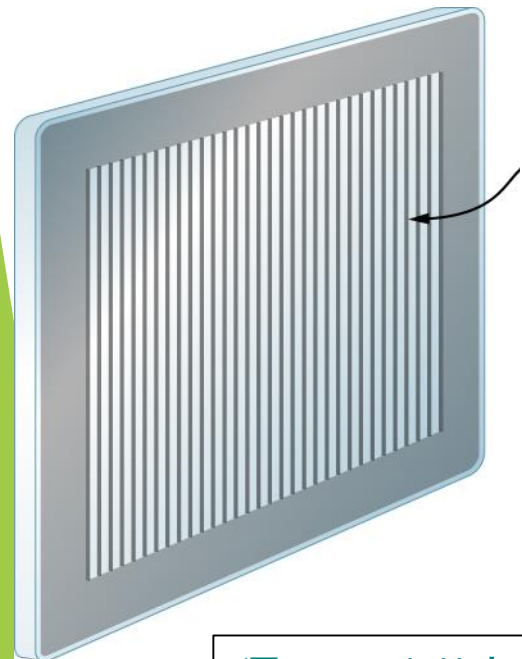
# Difrakcija na više pukotina

- Kako raste broj pukotina (izvora)  $N$ , mijenja se raspodjela intenziteta pri interferenciji.
- Maksimumi su sve uži i veći (vertikalna skala na slikama nije jednaka).



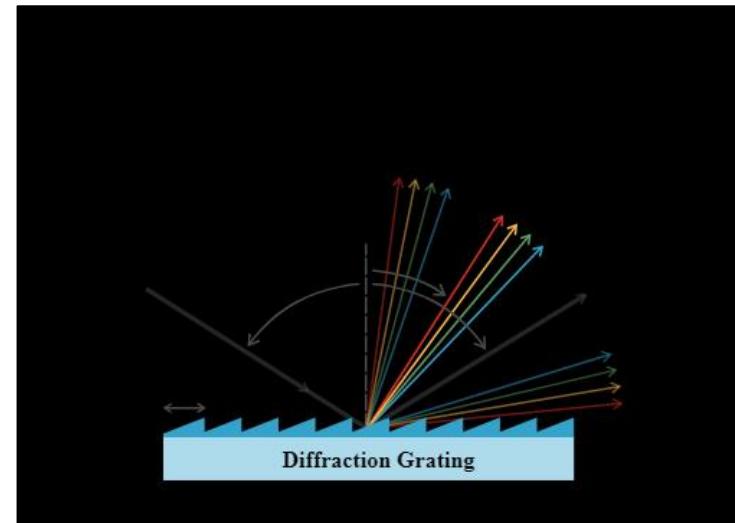
# Optička rešetka

- Niz ( $N$ ) ekvidistantnih uskih pukotina = optička rešetka.
- Svaka pukotina je široka  $a$ , razmak između pukotina je  $d$ .
- Konstanta rešetke  $d$  = razmak između pukotina.



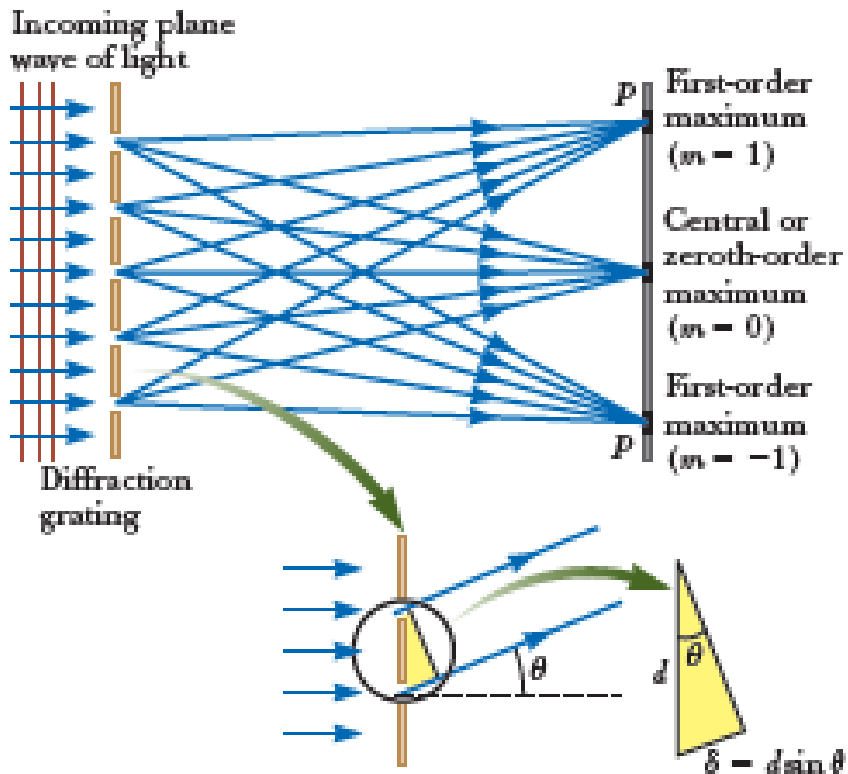
Niz paralelnih zarez zarezanih na staklenoj ploči. Dio između zarez predstavlja pukotine. 500-1000 zarez/mm

(Transmisijska) optička rešetka



Reflektirajuće optičke rešetke

# Optička rešetka



- Intenzitet:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)}{\left( \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda} \right)^2} \frac{\sin^2 \left( \frac{N \pi d \sin \theta}{\lambda} \right)}{\sin^2 \left( \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)}$$

Ogib na svakoj pukotini.

Interferencija  $N$  pukotina.

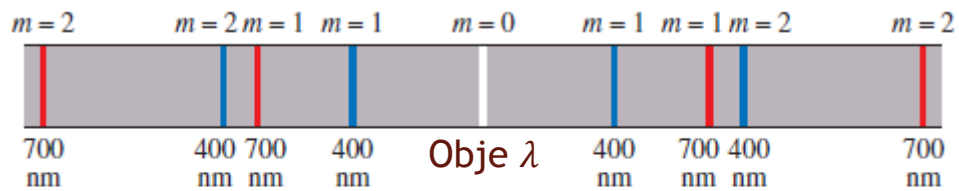
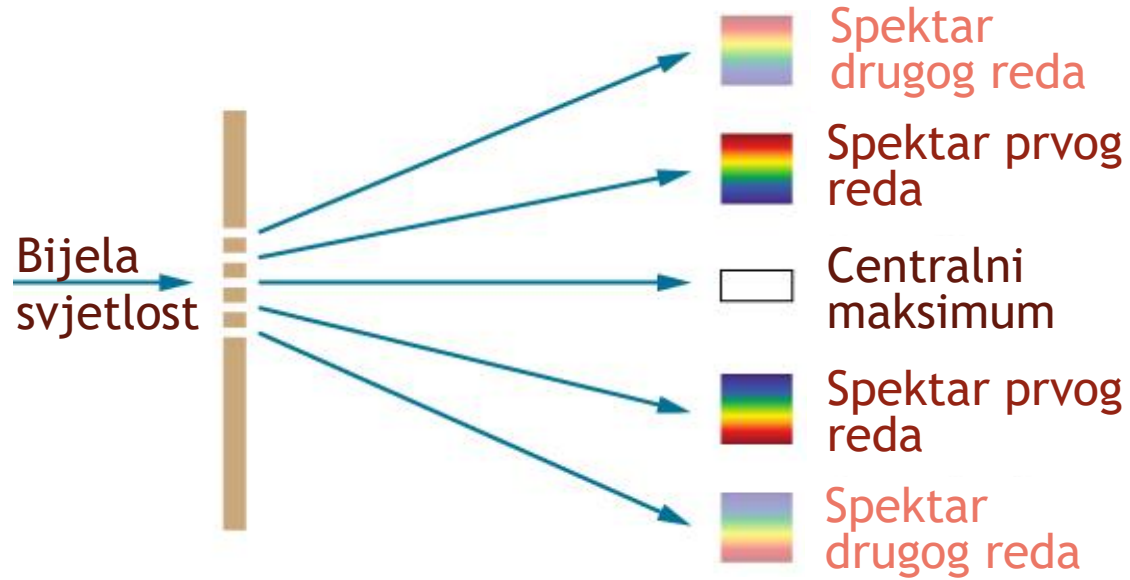
Jaki maksimumi kad je  $\sin \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} = 0$ , odnosno:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

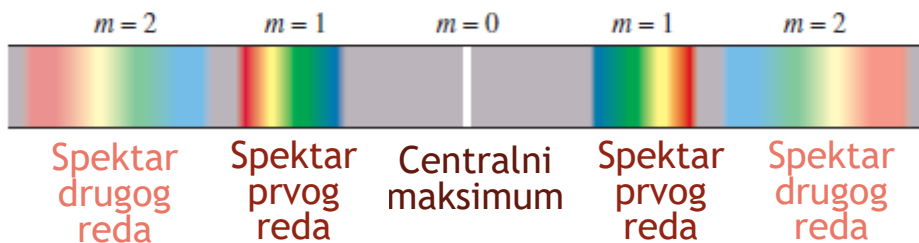
$$m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$m$  – red spektra

# Optička rešetka



Spektar dobiven optičkom rešetkom za svjetlost valne duljine 400 nm i 700 nm.

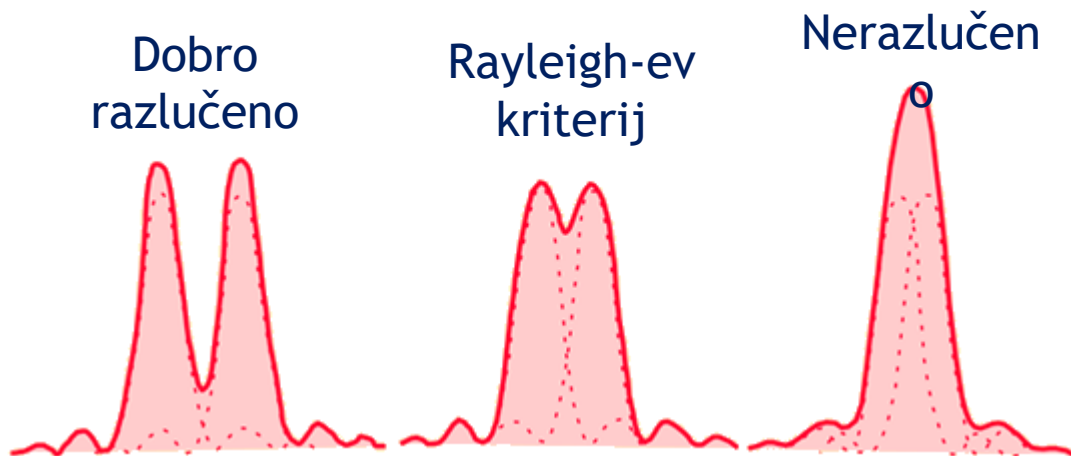


Spektar dobiven optičkom rešetkom za bijelu svjetlost.

# Optička rešetka - rezolucija i kutna disperzija

- Rezolucija, moć razlučivanja - najmanja razlika između dvaju valnih duljina  $\Delta\lambda$  koje rešetka može razlučiti,  $\lambda/\Delta\lambda$ .
- Maksimum  $m$ -tog reda valne duljine  $\lambda + \Delta\lambda$  mora pasti na rub maksimuma (tj. na prvi susjedni minimum) za valnu duljinu  $\lambda$  – Rayleigh-ev kriterij

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$$



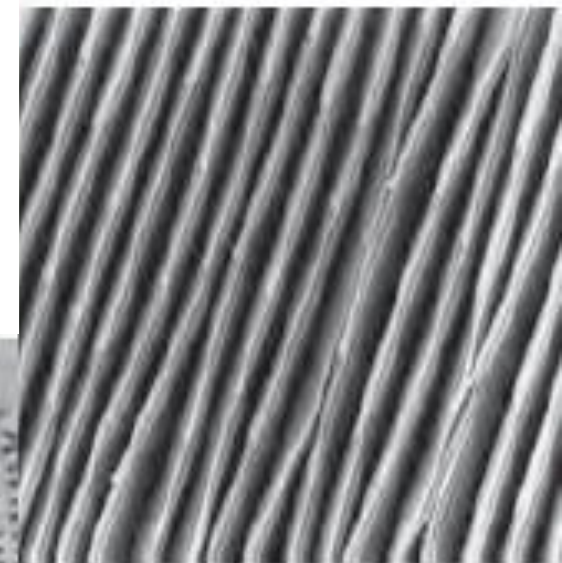
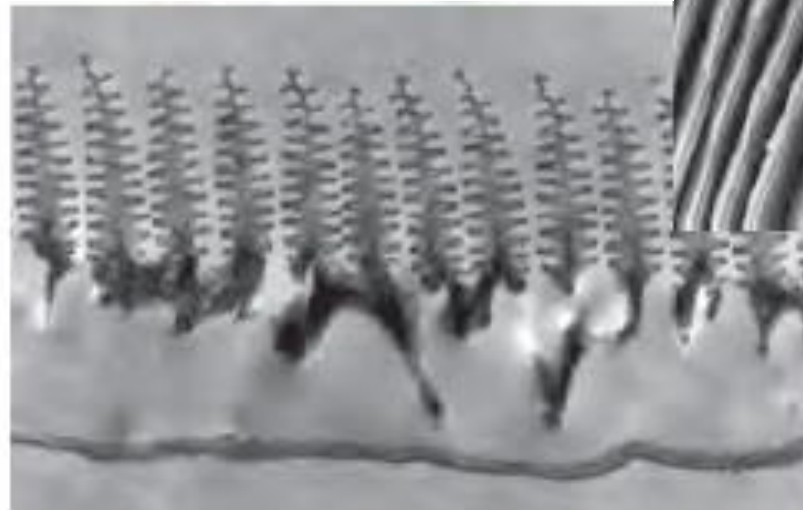
Kutna disperzija rešetke,  $\frac{d\theta}{d\lambda}$

$$d \sin \theta = m\lambda$$

$$d \cos \theta d\theta = m d\lambda$$

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}$$

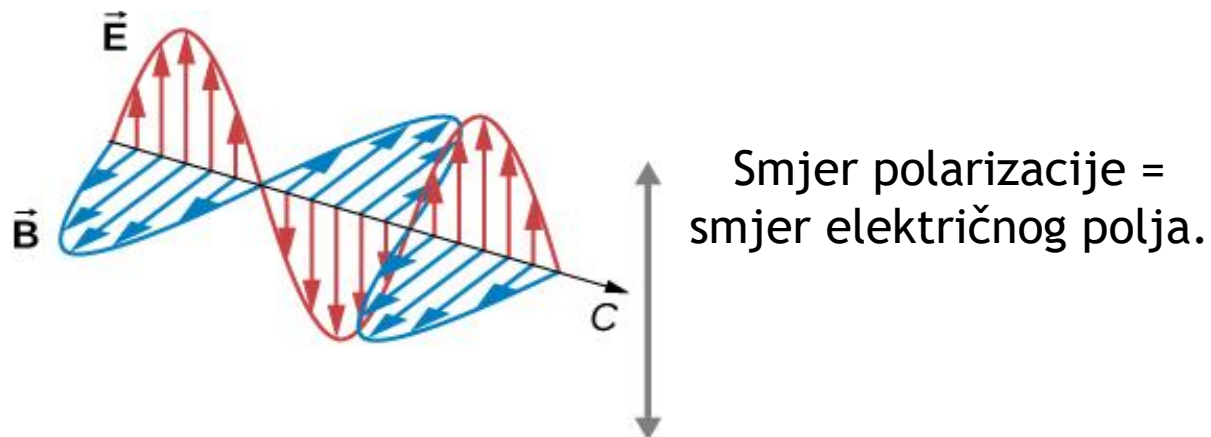




Konstruktivna interferencija i ogib  
za plavu svjetlost na strukturi  
krila.



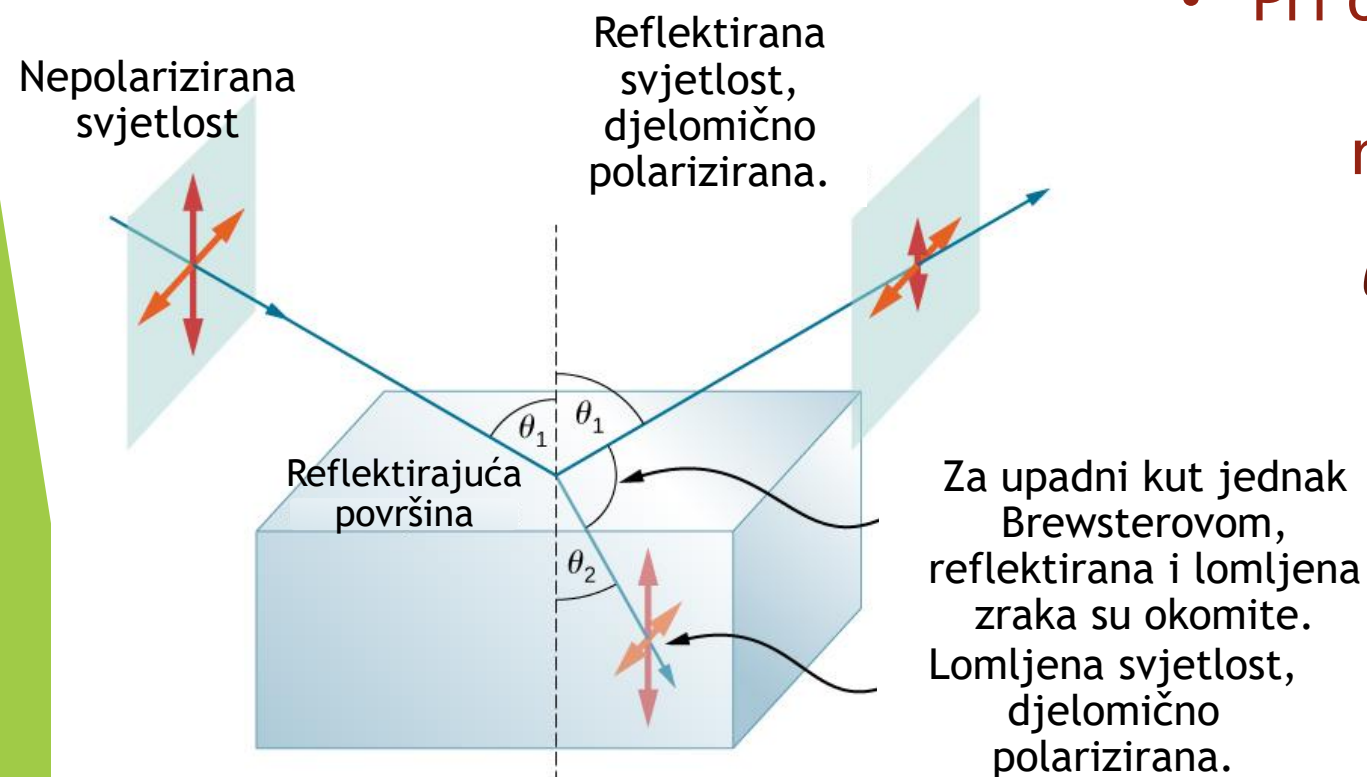
# Polarizacija svjetlosti



- Obična svjetlost sastavljena je od velikog broja valova koji su polarizirani u svim ravninama okomitim na smjer širenja - nepolarizirana svjetlost.
- Polarizacija nam pokazuje da su svjetlosni valovi transverzalni.
- Kako od nepolarizirane svjetlosti možemo dobiti polariziranu svjetlost?
  - Pomoću polaroida (dikroični kristali)
  - Refleksijom
  - Kristalima dvolomcima.

# Polarizacija svjetlosti refleksijom

- Opaženo je da se više reflektiraju valovi čiji električni vektor titra okomito na upadnu ravninu (ravnina papira), odnosno paralelno reflektirajućoj površini.
- Reflektirana i lomljena zraka su djelomično polarizirane.



- Pri određenom kutu dolazi do potpune polarizacije reflektirane svjetlosti:

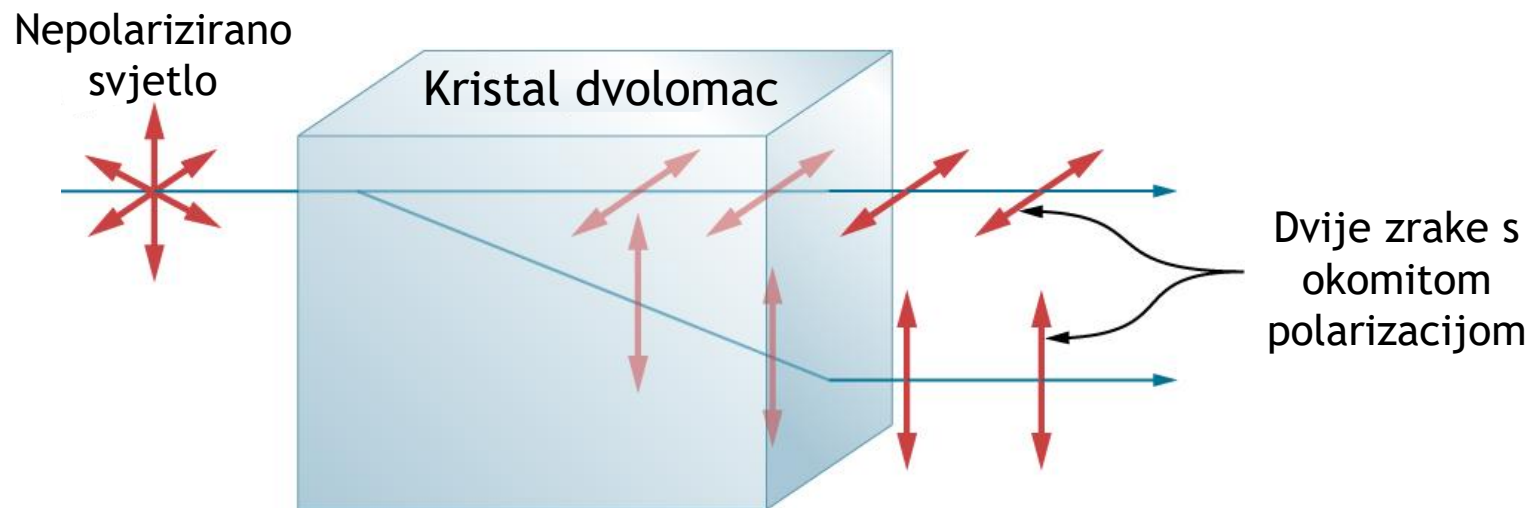
$$\theta_1 = \theta_B: \theta_B + \theta_2 = 90^\circ$$

$$\tan \theta_B = n$$

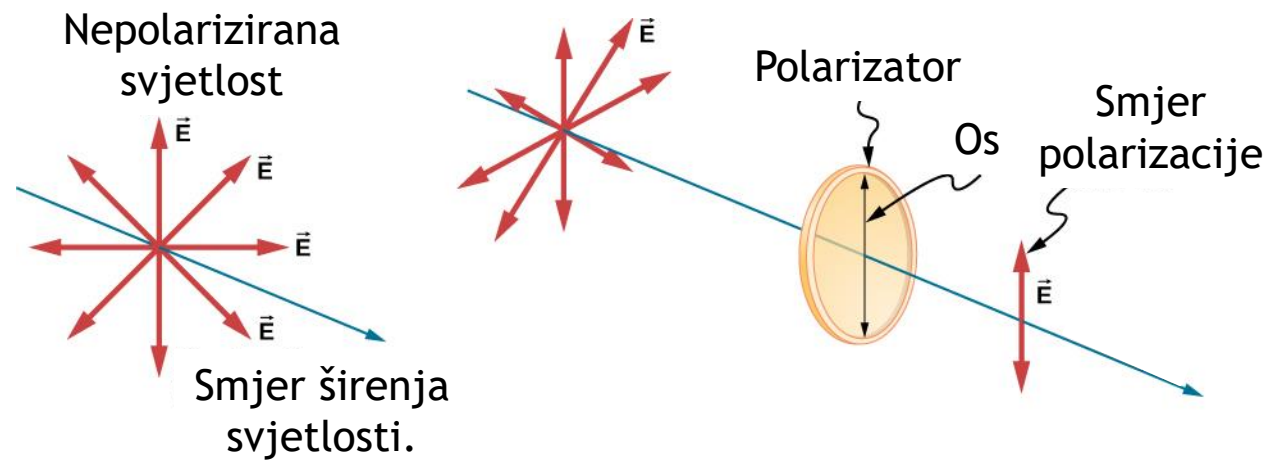
Brewsterov kut

# Polarizacija svjetlosti - dvolomac

- Anizotropni (različiti smjerovi različita optička svojstva) kristali (npr. kalcit  $\text{CaCO}_3$ ) mogu za određeni kut upada nepolariziranu svjetlost lomiti u dvije različito polarizirane zrake.
- Kristal ima različiti indeks loma za različite polarizacije - zato se lome pod različitim kutovima.



# Polarizacija svjetlosti - polarizator

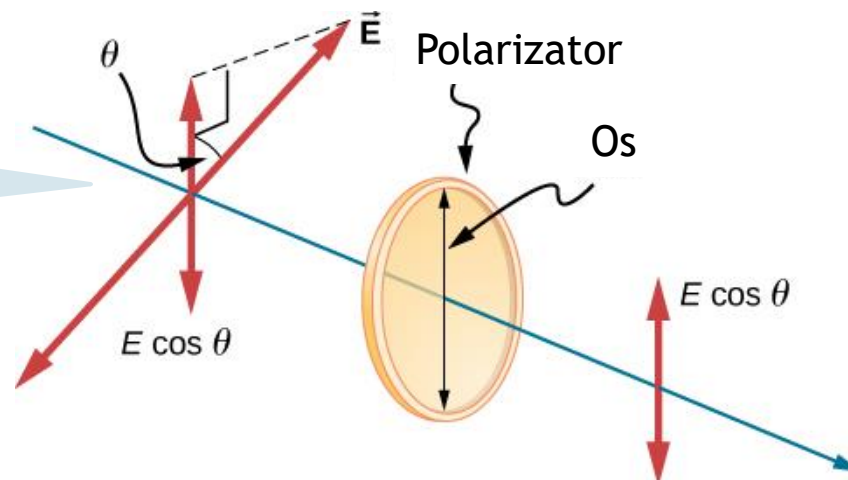


- Polaroid - komercijalni naziv - dikroični kristali koji propuštaju svjetlost čiji vektor električnog polja titra samo u jednom smjeru, ostalu apsorbiraju.
- Os polarizatora - os duž koje propušta električno polje EM vala.

# Polarizacija svjetlosti (Malusov zakon)

- Samo komponenta polja paralelna osi polarizatora prolazi kroz polarizator.
- Električno polje zatvara kut  $\theta$  s osi polarizatora, prolazi  $E \cos \theta$ .
- Intenzitet propuštene svjetlosti:

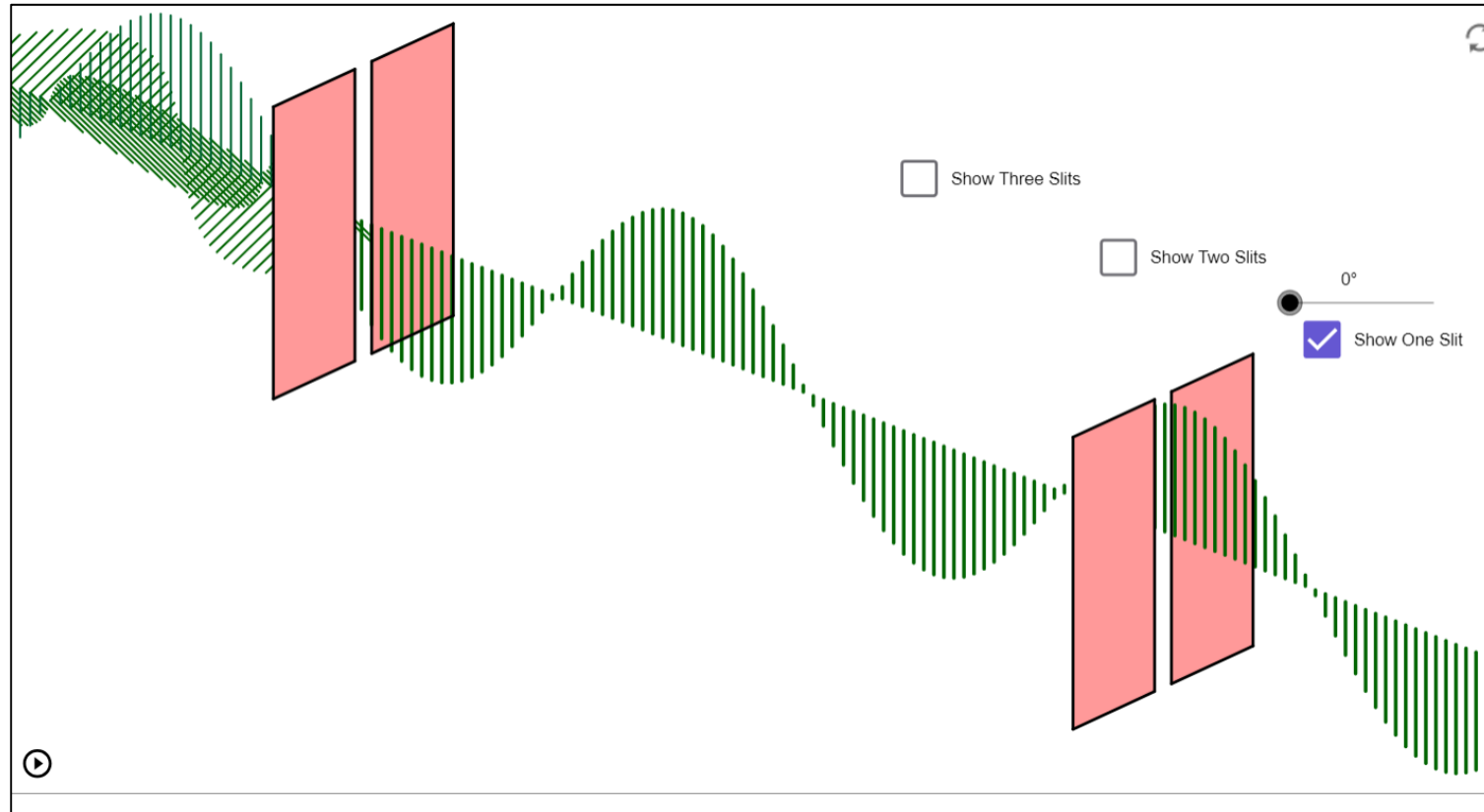
Ovo je već polarizirana svjetlost kroz jedan polarizator, intenziteta  $I_0$

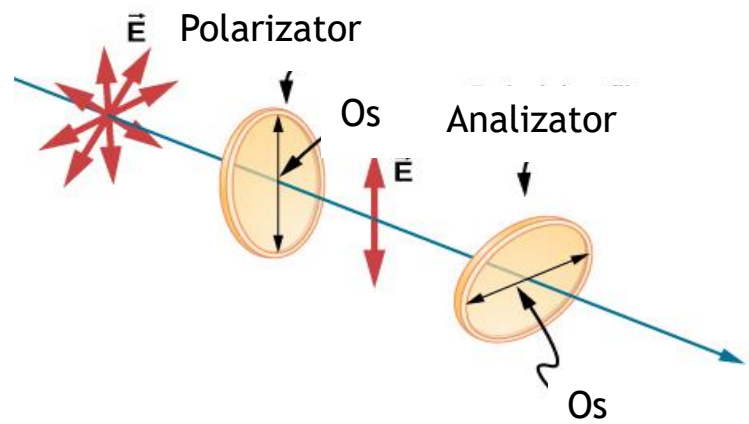
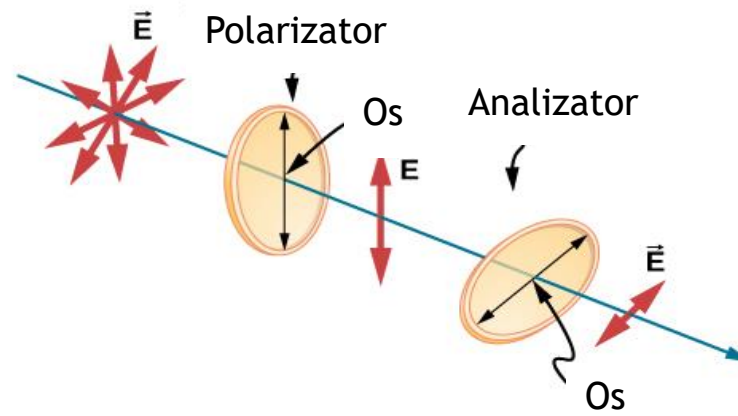
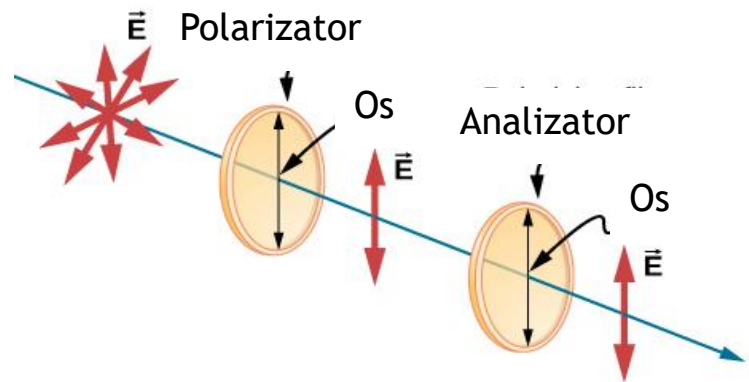


$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Malusov zakon

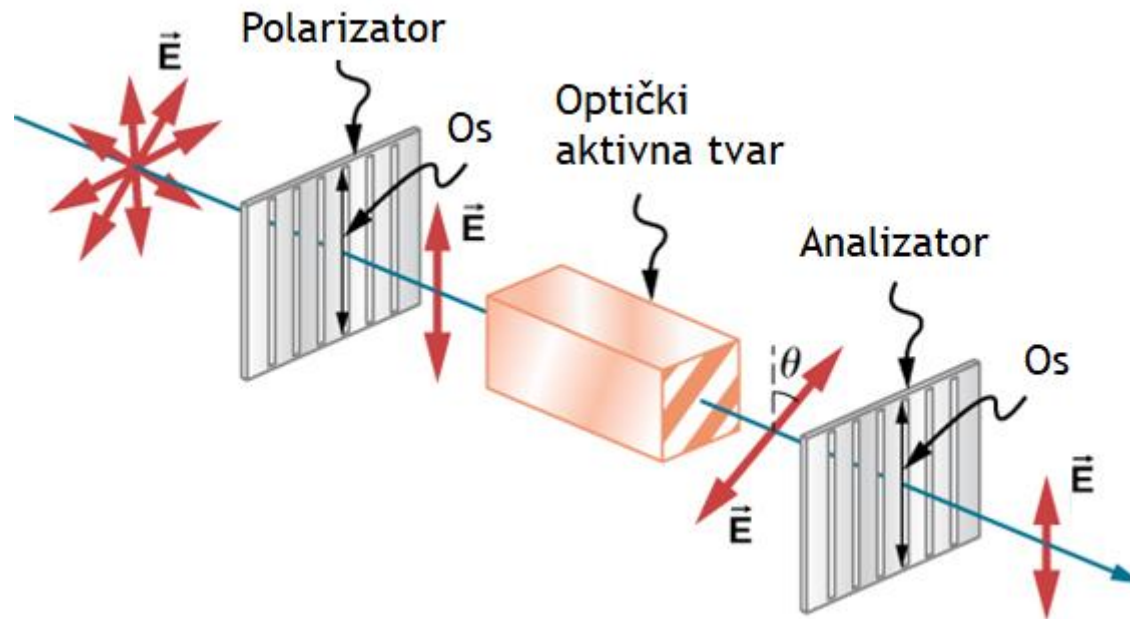
# Simulacija: Polarizacija svjetlosti





# Polarizacija svjetlosti - optički aktivne tvari

- Zakreću ravninu polarizacije.
- Zakret ovisi o debljini optičke tvari, koncentraciji i o valnoj duljini svjetlosti.



- Primjeri: vodena otopina šećera, tekući kristali...
- Staklo i plastika mogu postati optički aktivni pod velikim mehaničkim opterećenjem.

