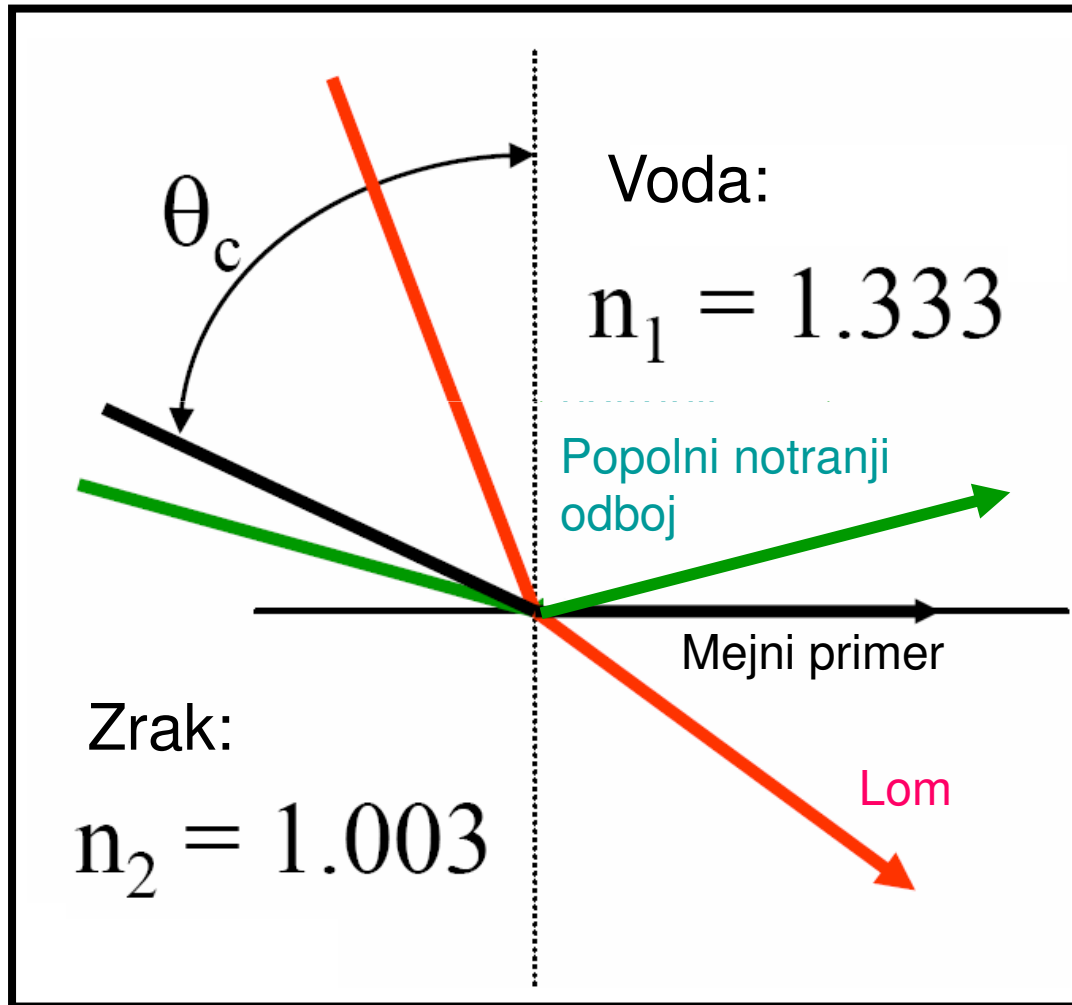


Temeljni optični pojavi



Mobitel d.d.,
izobraževanje

4. 3. 2010,
predavanje 2

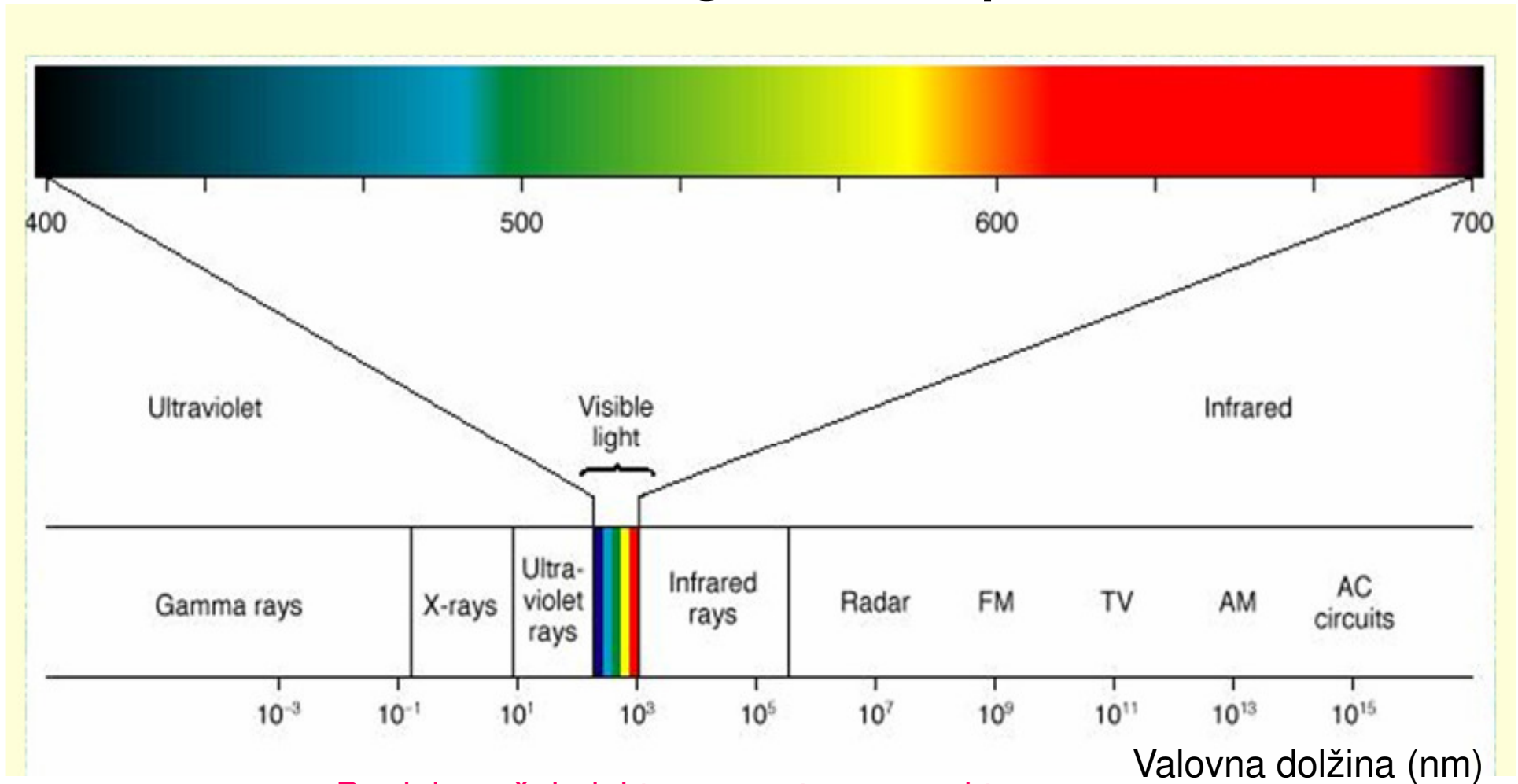
Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Svetlobni spekter
2. Toplotno sevanje
3. Značilnosti polja, valov in snovi
4. Enačbe polja, valovni in kvantni pojavi
5. Sipanje
6. Uklon
7. Odboj, lom in totalni odboj
8. Interferenca
9. Snovna disperzija
10. Polarizacija
11. Geometrijska optika
12. Optični vodniki
13. Sevanje

Spekter in barve

Elektromagnetni spekter



Dvojni značaj elektromagnetnega spektra:

Kvantni značaj spektra

Foton

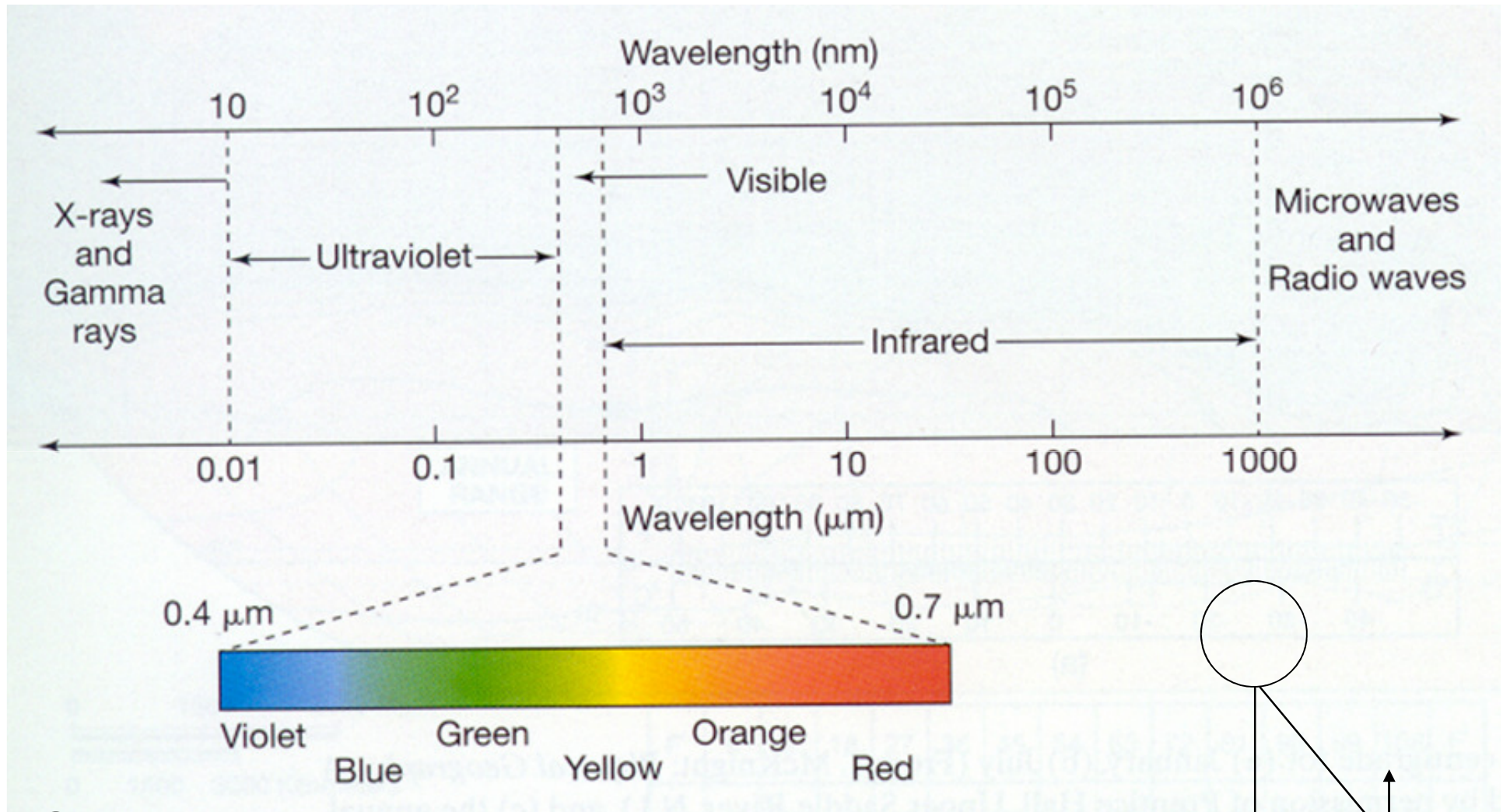
Energija $h\nu$, gibalna količina h/λ

Valovni značaj spektra

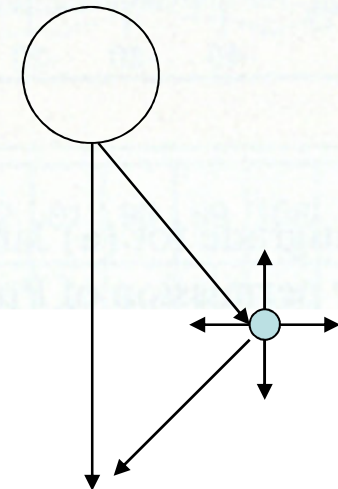
Polje

Gostota moči $Eh/2$; valovna dolžina λ

Svetloba in barve

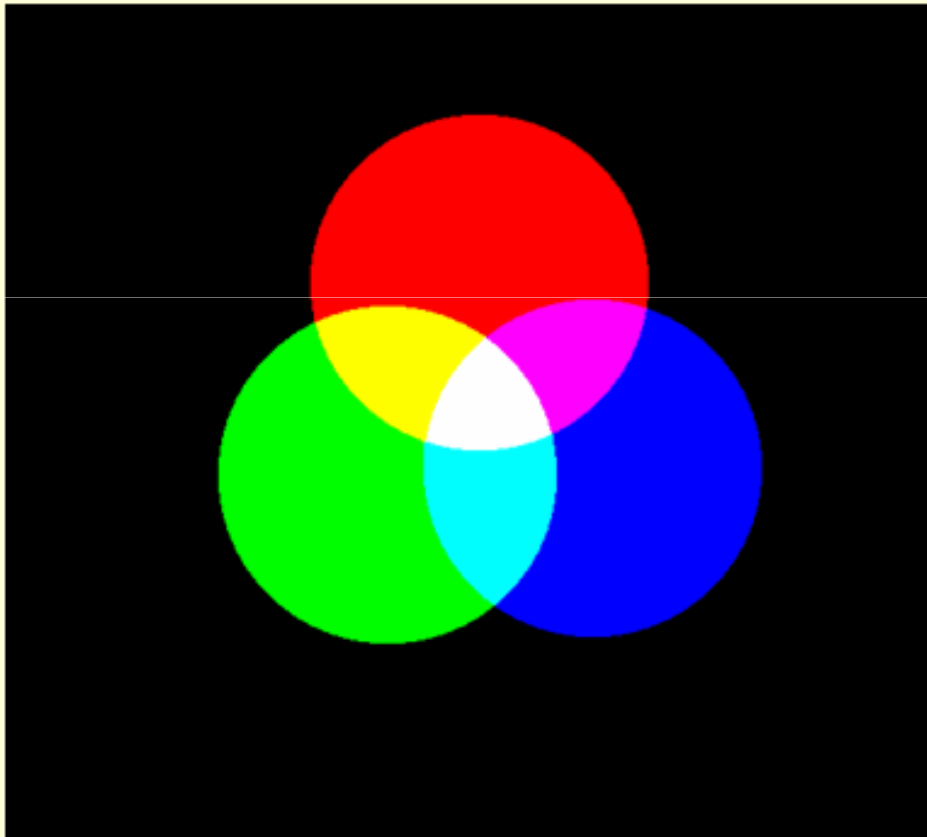


Svetloba je bela, nebo je **modre** barve, sonce je **rumenkasto**, večernje ali jutranje sonce je **oranžno**, maksimum spektra je **v zeleno-rumenem** delu!



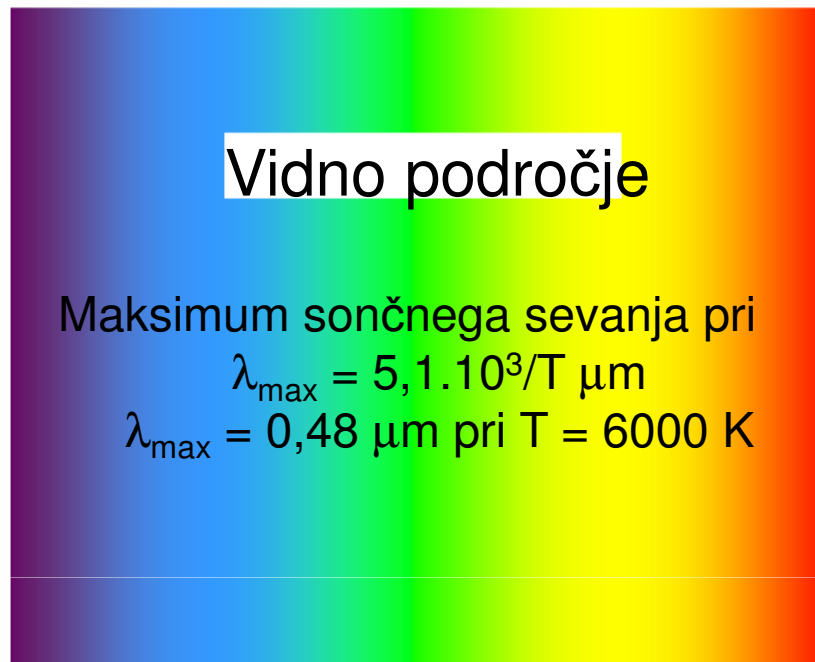
Sinteza barv – fiziološki učinki

Aditivnost barv



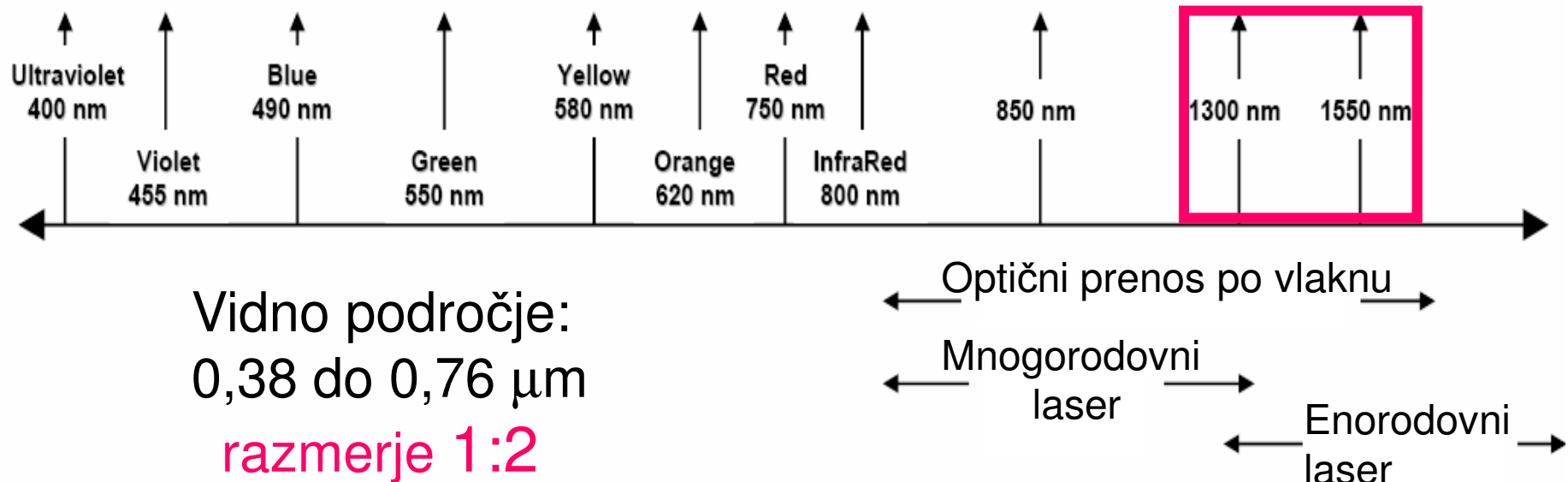
- **Red**, **Green**, and **Blue** light sources can be used to synthesize almost any perceivable color
- **Red** + **Green** = **Yellow**
- **Red** + **Blue** = **Magenta**
- **Green** + **Blue** = **Cyan**
- These three dual-source colors become the primary colors for subtraction
 - why? because absence of **green** is **magenta**
 - absence of **red** is **cyan**, etc.

Optični spekter



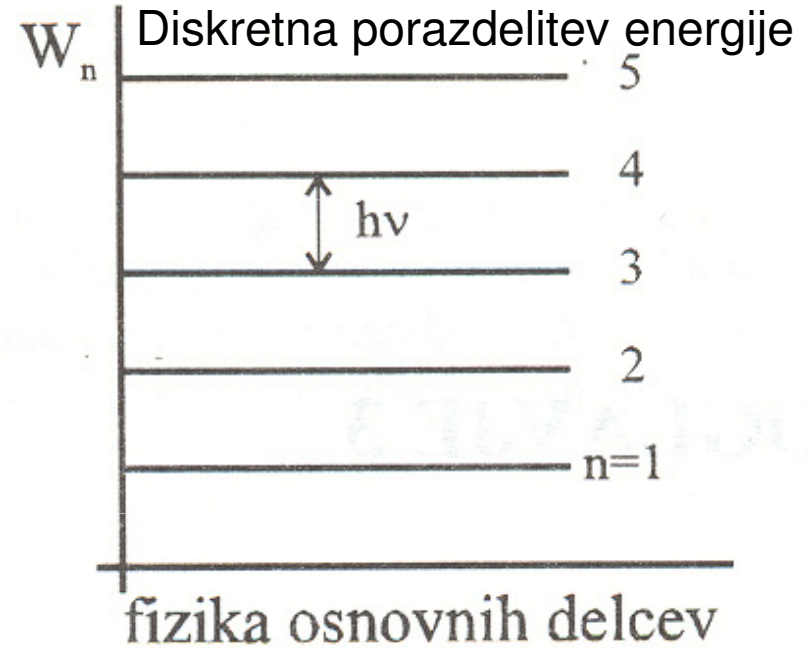
Nevidno področje

Področje
optičnih komunikacij
1300 do 1650 nm
razmerje 1:1,27



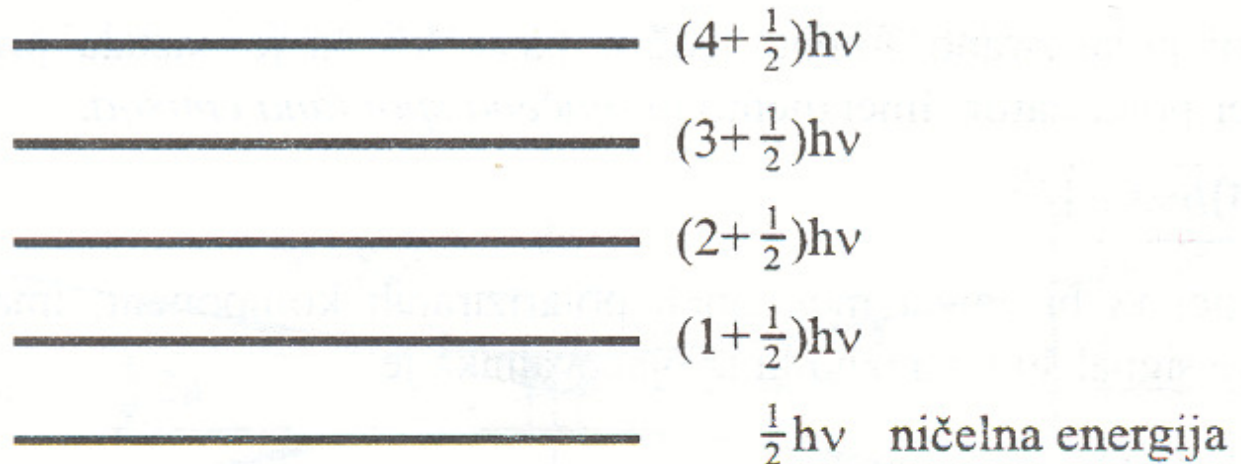
Toplotno sevanje

Energijski nivoji

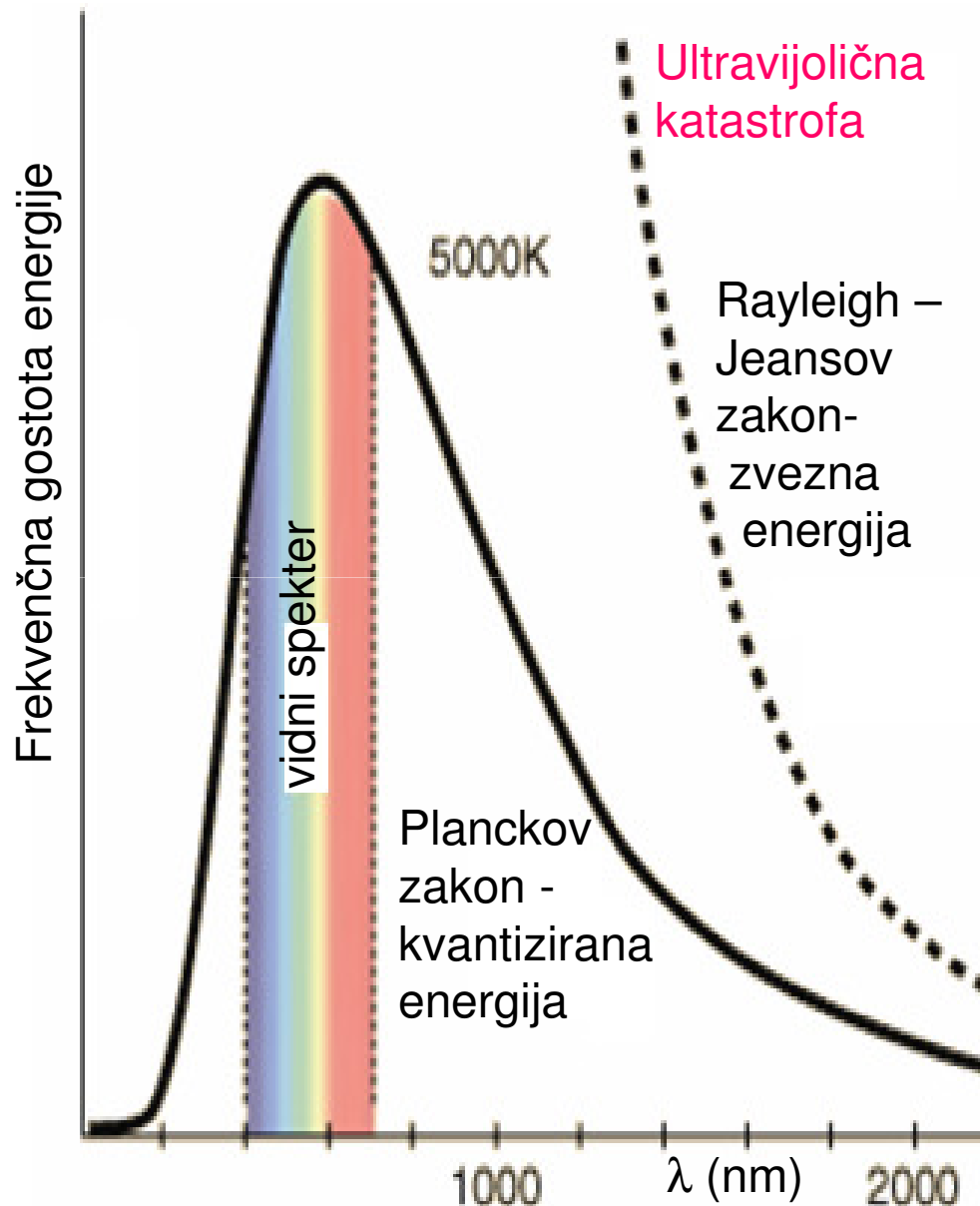


Kvantizacija
elektromagnetnega
polja

Kvantni šum



Zakon sevanja črnega telesa



[23.4.1858 – 4.10.1947]



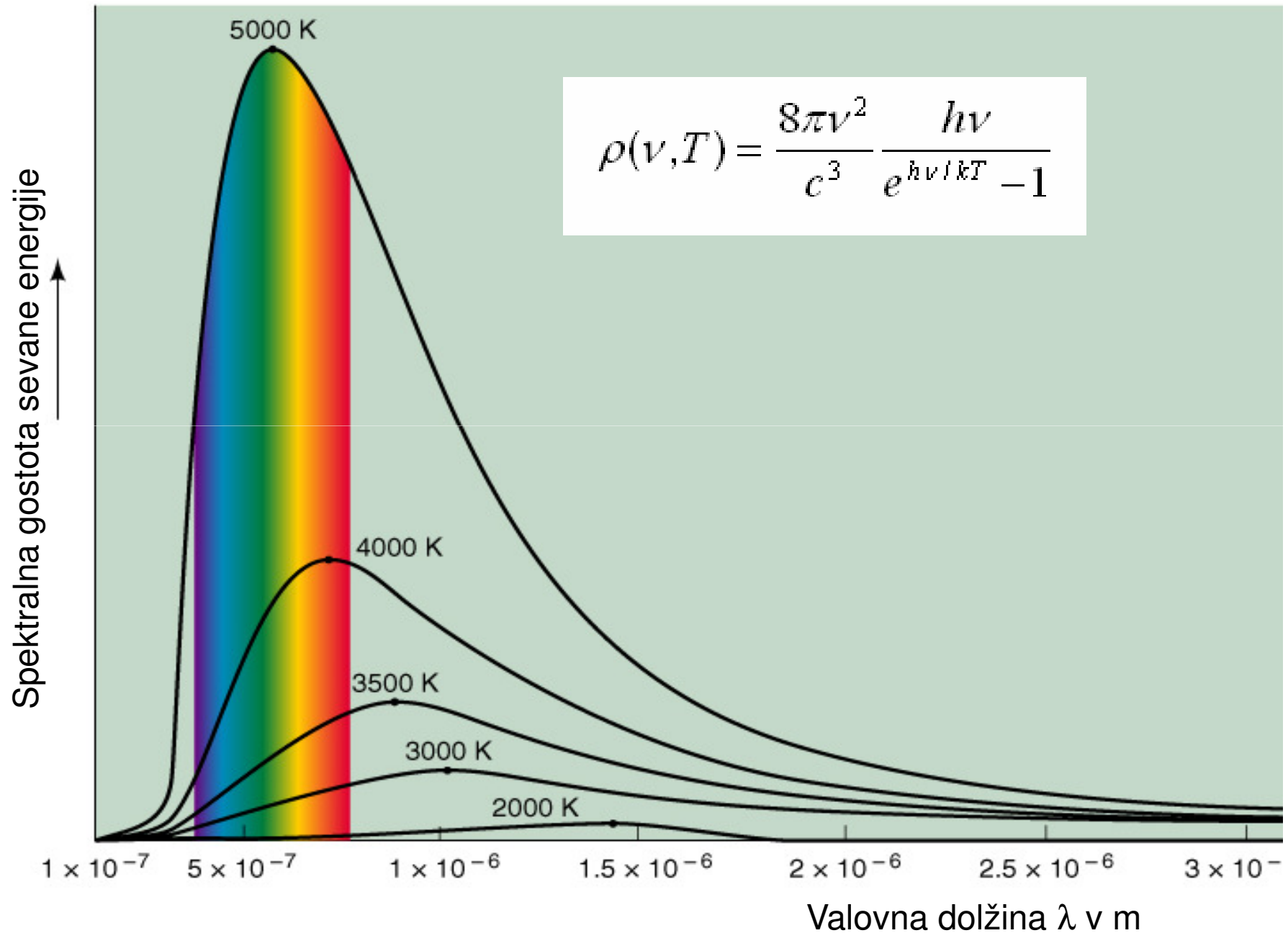
1900
Nobelova
nagrada
1918

Kvantizaciji
energije ni
pripisoval
fizikalnega
pomena

1/3
industrijske
dejavnosti ZDA
sloni na Planckovi
konstanti h

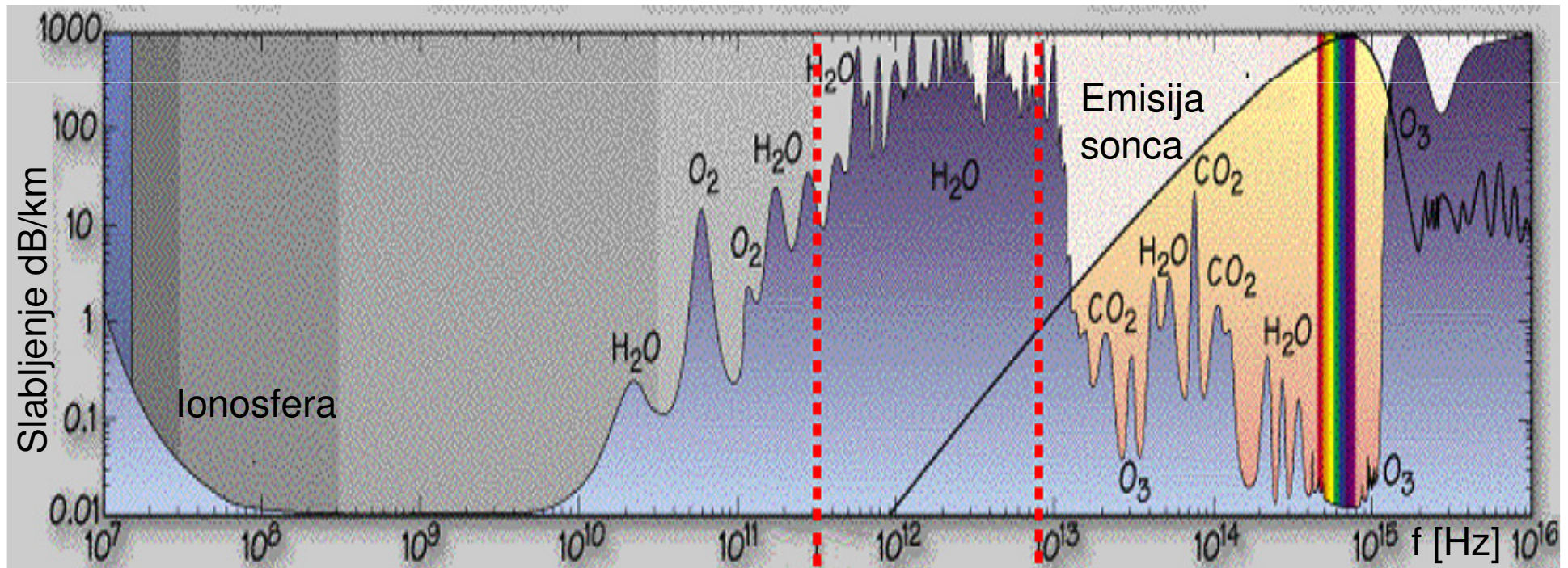
Max Karl Ernst Ludwig Planck

Planckov zakon sevanja črnega telesa

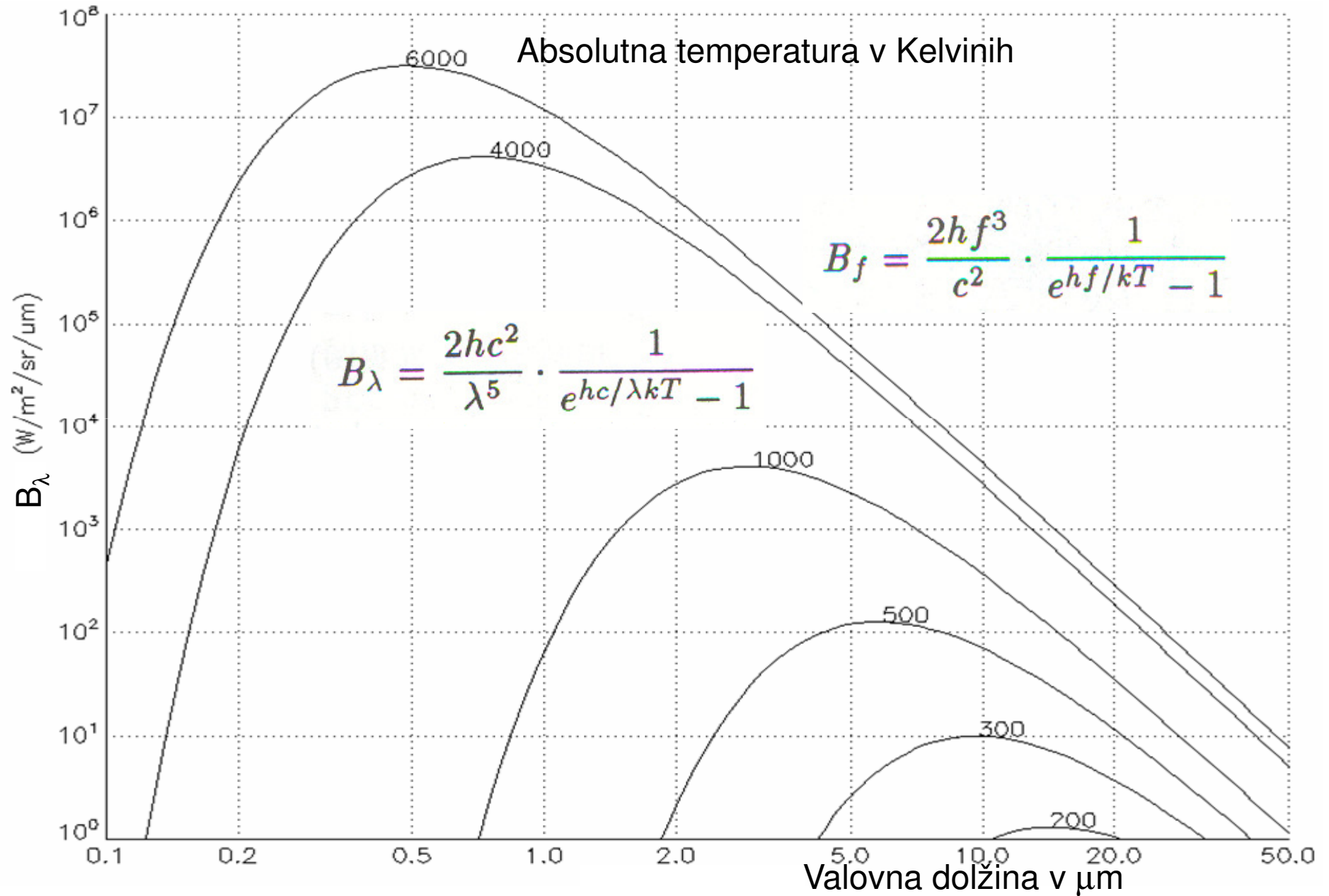


Spekter slabljenja atmosfere

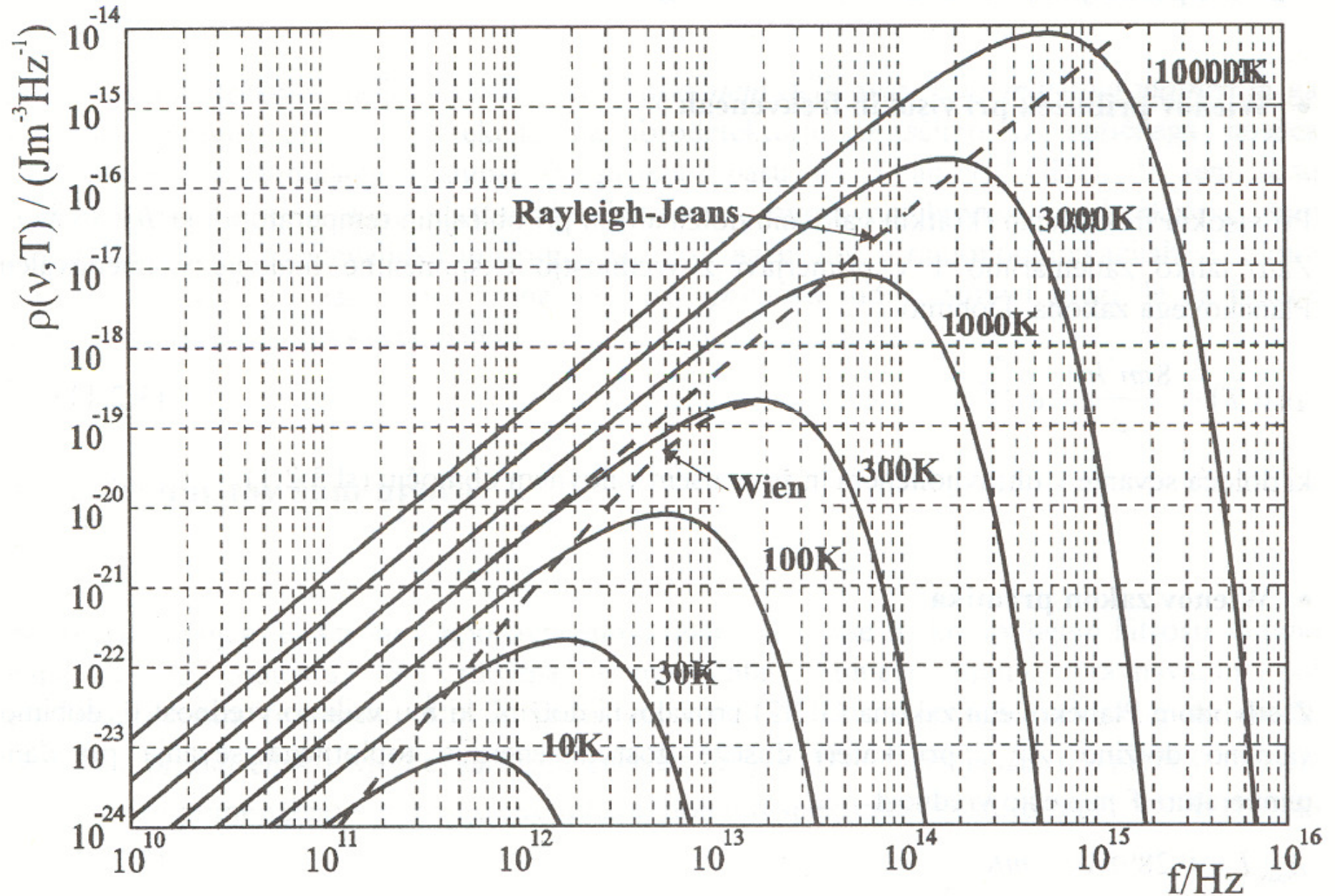
- Izredno visoko slabljenje na področju podmilimetrskih valov
- Vibracijski in rotacijski energijski nivoji H_2O povzročajo slabljenje
- Slabljenje je odvisno od geografske lokacije in klimatskih razmer
- Izkoriščamo frekvenčne pasove minimalnega slabljenja (<100 dB/km)
- Možnost komunikacije na zelo kratkih razdaljah.



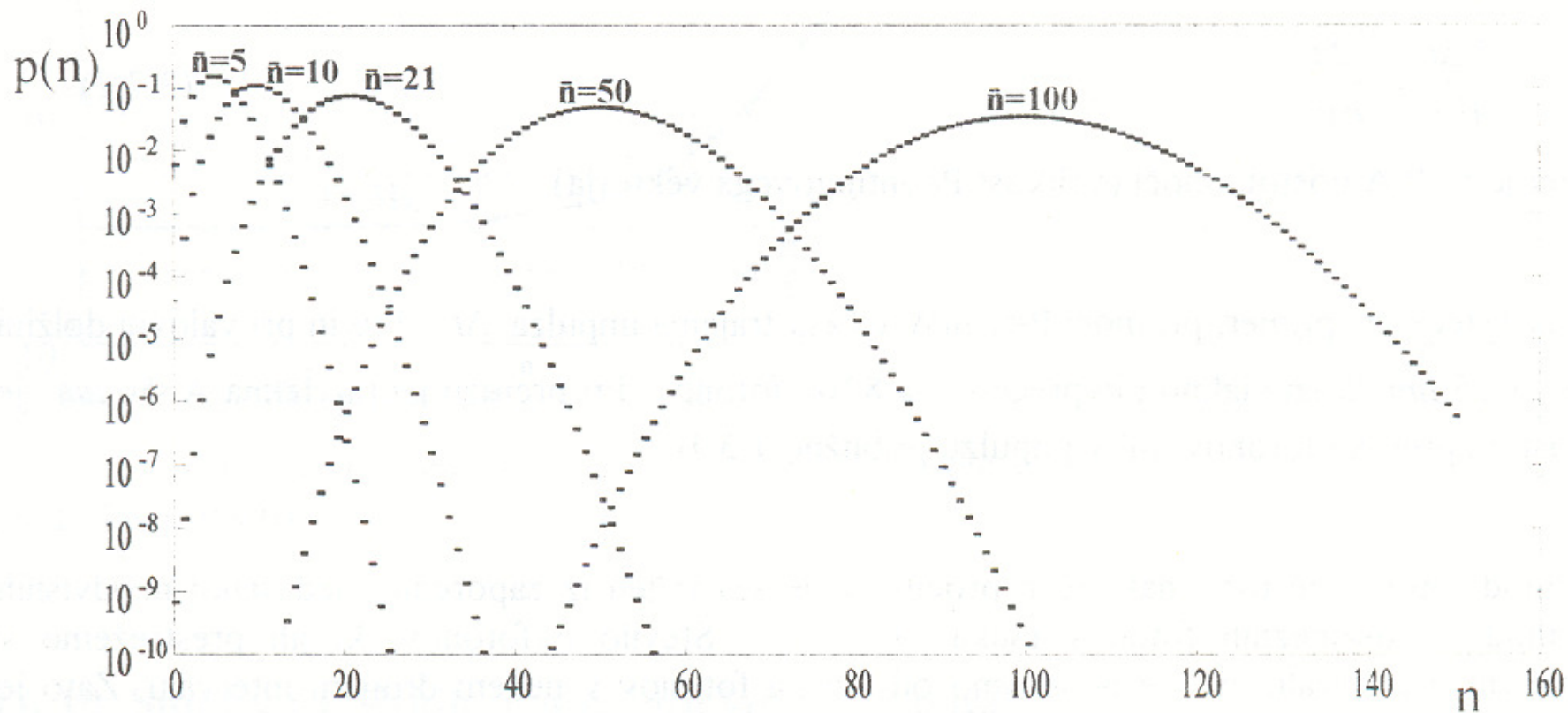
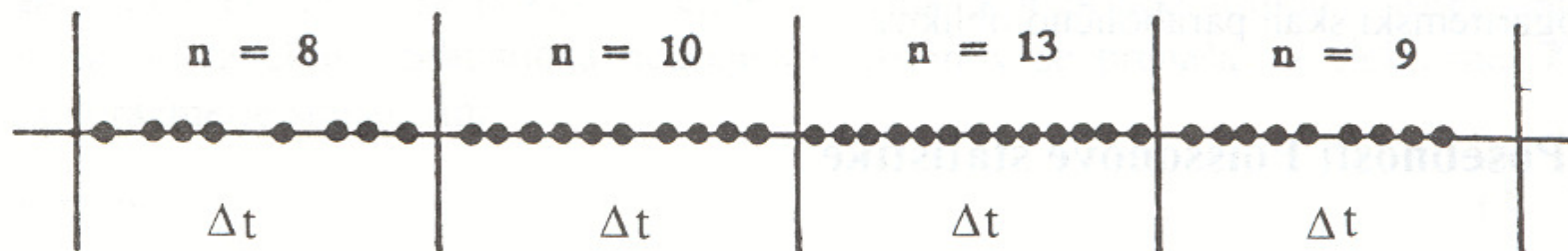
Planckov zakon sevanja črnega telesa



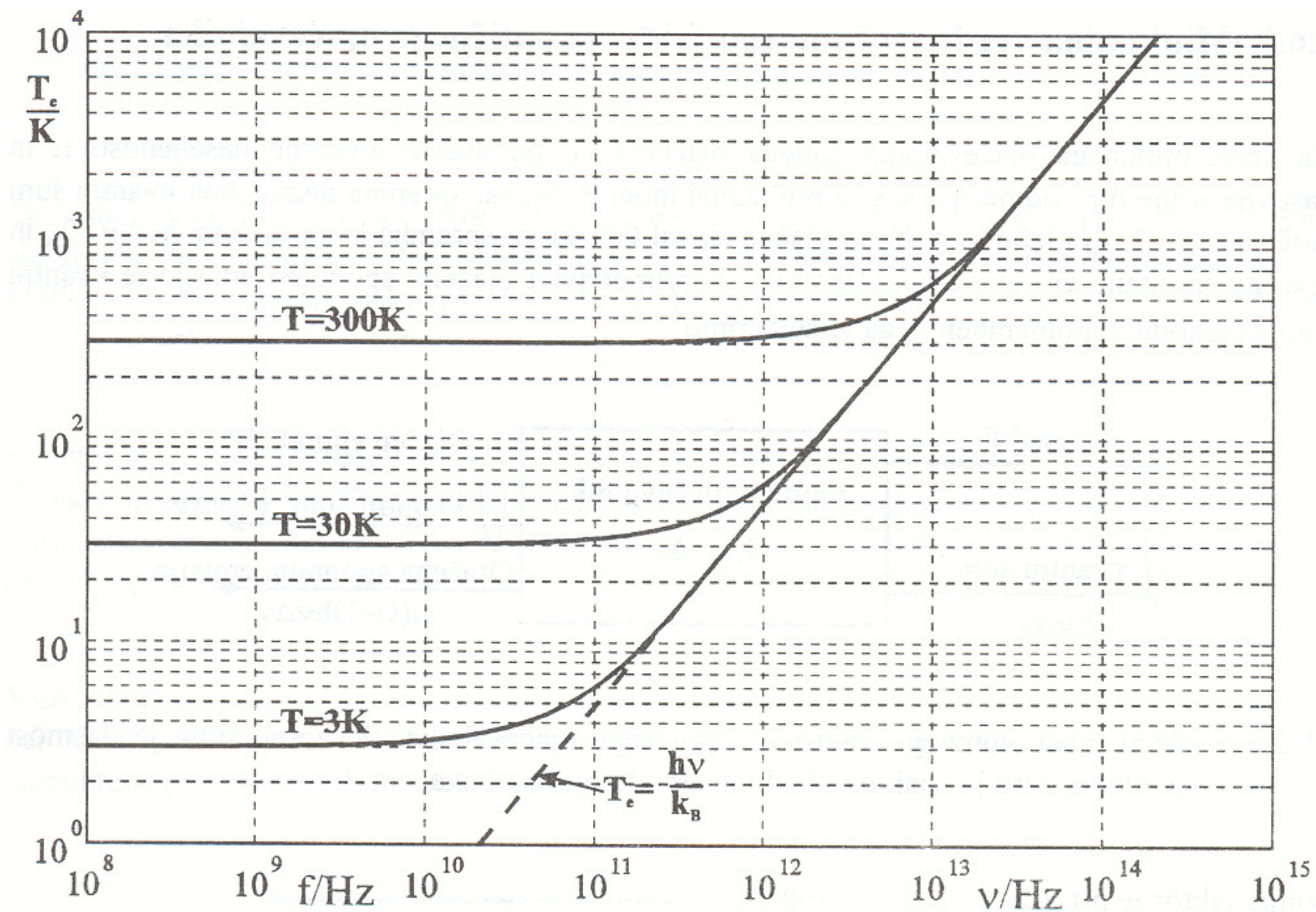
Planck, Rayleigh-Jeans, Wien



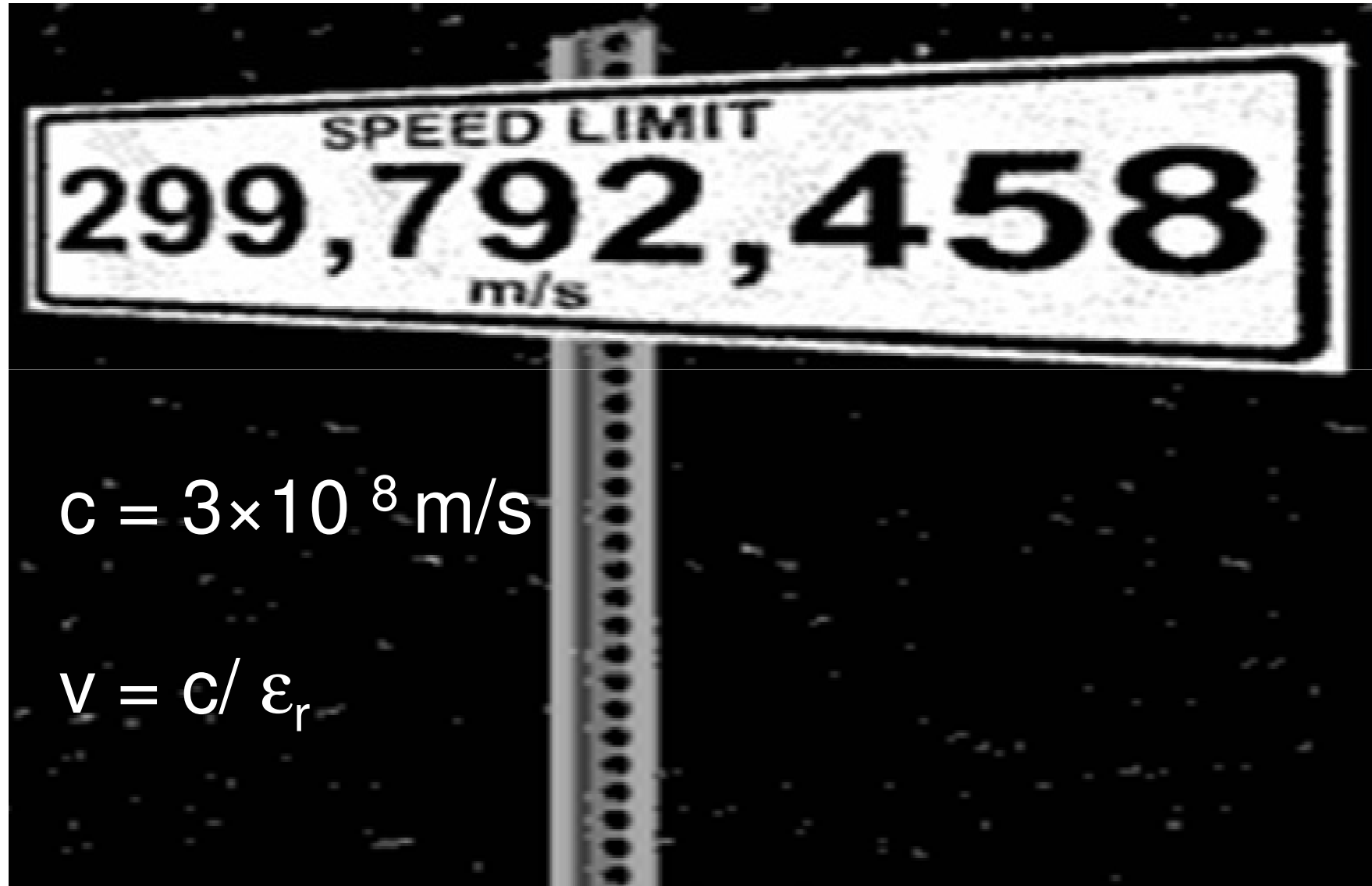
Zrnatost – Poissonova statistika



Toplotni in kvantni šum



Hitrost svetlobe



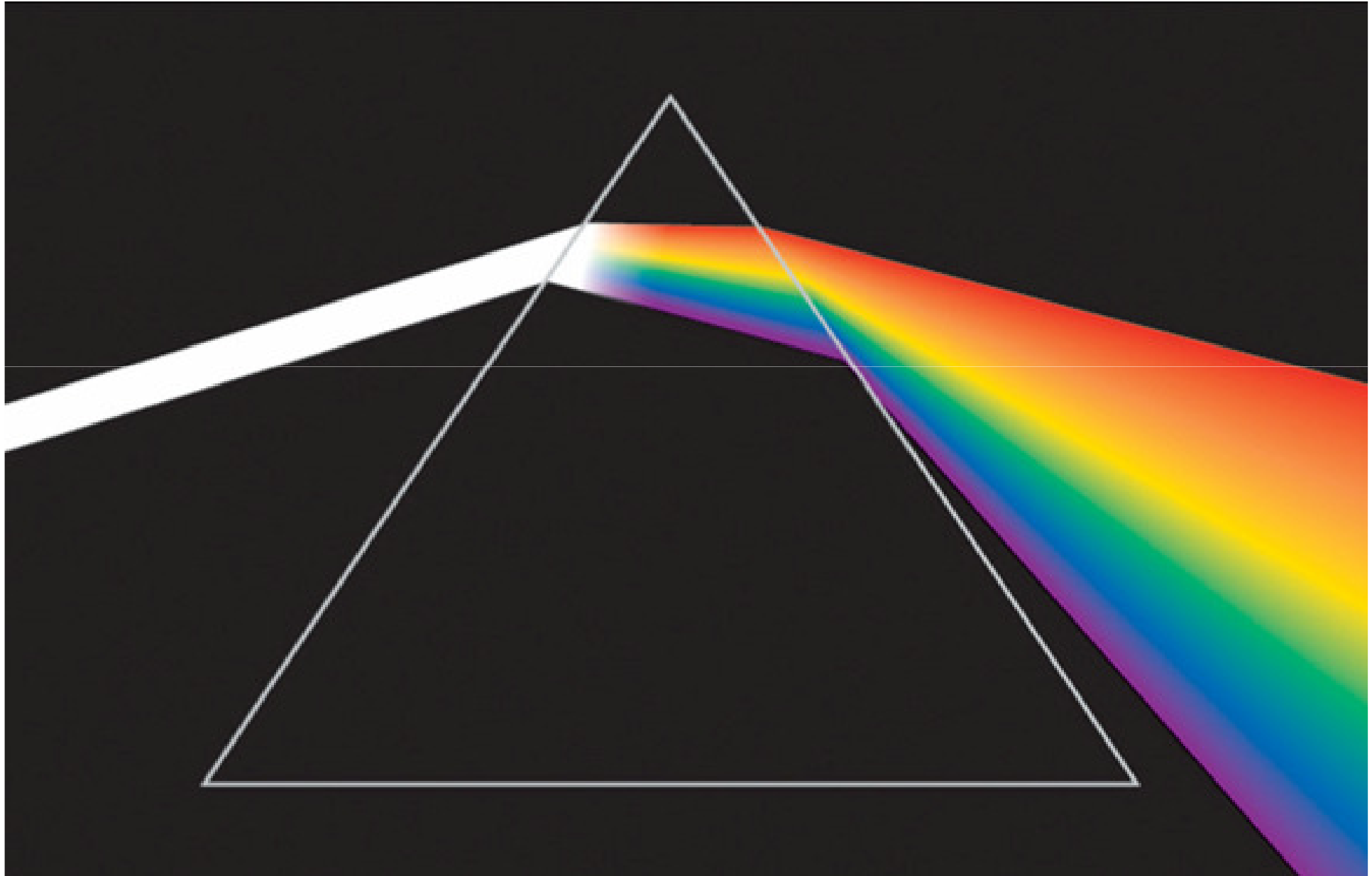
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$v = c / \epsilon_r$$

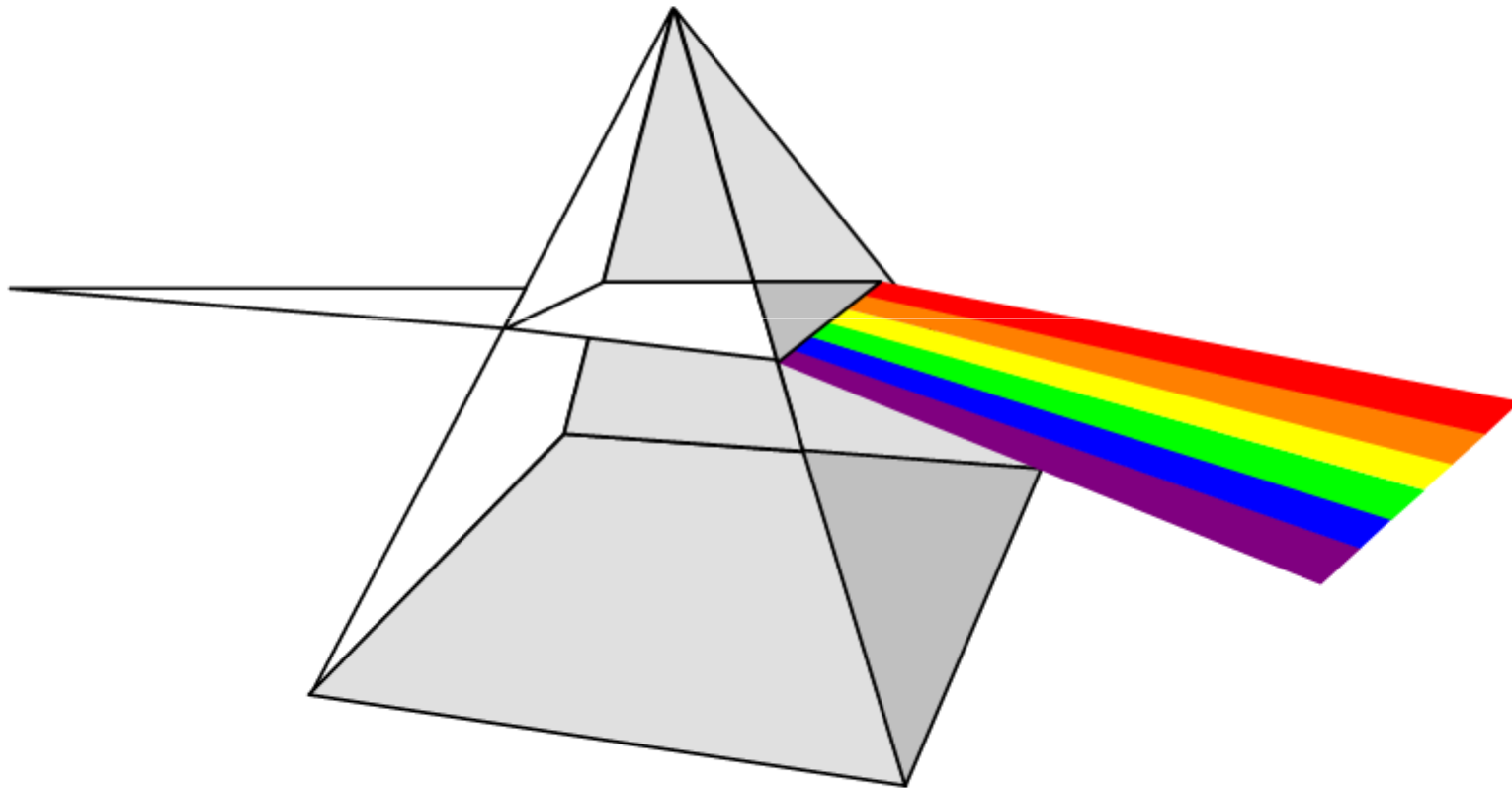
Razklon (disperzija) svetlobe na prizmi



Razklon svetlobe



Optical Basics



Snov, polje in valovi

JAMES CLERK MAXWELL

James Clerk Maxwell

1831 Edinburgh

**1879 Cambridge, predstojnik
Cavendishovega laboratorija**

**Združil elektriko in magnetizem
v enotni elektromagnetizem**

**Ugotovil, da je svetloba
elektromagnetno valovanje**

- Elektromagnetna teorija
- Kinetična teorija plinov



Maxwellove enačbe

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Ampèreev zakon
za prostor brez toka

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Faradayev
zakon

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

Gaussov zakon za
prostor brez proste
elektrine ali
magnetine

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Maxwellove enačbe za homogeni prostor

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \varepsilon(x, y, z; t) = \textit{konst.}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \mu(x, y, z; t) = \textit{konst.}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

Posplošene Maxwellove enačbe

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \sigma_e \vec{E} + \vec{J}_e$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \sigma_m \vec{H} - \vec{J}_m$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

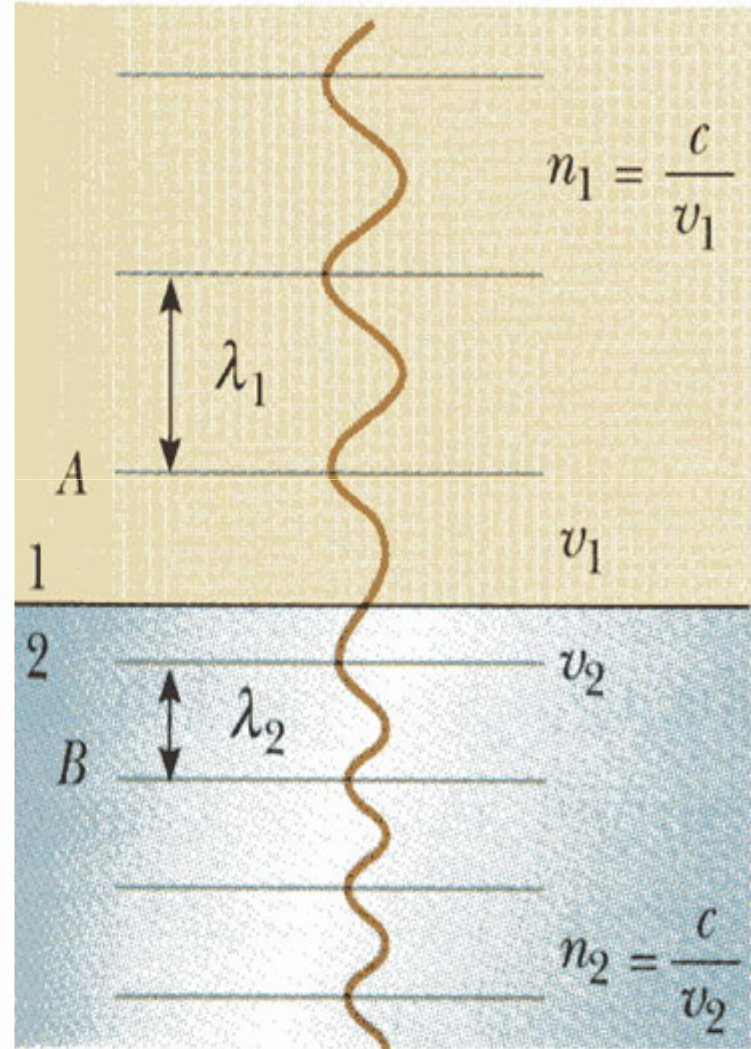
$$\nabla \cdot \vec{B} = \overset{e}{\rho}_m$$

← Navidezni magnetni viri

Lomni količník

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad n = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\lambda_{\text{medium}} = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n}$$



Optična pot

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{hitrost svetlobe v vakuumu}}{\text{hitrost svetlobe v snovi}}$$

Lomni količnik

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

Čas, potreben za pretek poti dolžine ds v snovi lomnega količnika n

$$T = \int_A^B dt = \frac{1}{c} \int_A^B n ds$$

Čas, potreben za pretek poti od A do B v nehomogeni snovi lomnega količnika n

$$\Lambda = cT = \int_A^B n ds$$

Optična pot med točkama A in B

Značilni valovni pojavi

- odboj (refleksija), totalni odboj (Tyndall), lom (refrakcija, Fresnel), “totalni” lom (Brewster)
- uklon (difrakcija)
- razprševanje ali sipanje (Rayleigh)
- polarizacija
- nelinearna refrakcija (Kerr), nelinearno sipanje (Raman, Brillouin)
- barvni razklon, dvolomnost (disperzija)
- sevanje (radiacija), spontana emisija, stimulirana emisija (Einstein)
- zrnati (kvantni) šum
- mešalni šumi in drugi šumi
- sprejem (detekcija), mešanje (heterodiniranje)

Snov, materiali

- homogena, nehomogena
- izgubna, brez izgub
- disperzna, nedisperzna
- linearna, nelinearna
- recipročna, nerecipročna
- enolomna, dvolomna
- izotropna, neizotropna
- negativno dielektrična (plazmoni)
- negativno lomna (metamateriali)
- drugo

Značilnosti snovi

- Homogena: σ , ε in μ konstantni v prostoru
- Nehomogena: σ , ε in/ali μ spremenljivi v prostoru
- Izgubna: σ končen, $\text{Im}(\varepsilon, \mu) \neq 0$
- Neizgubna: $\sigma = \infty$, $\text{Im}(\varepsilon, \mu) = 0$
- Linearna: σ , ε in μ neodvisni od E oz. B
- Nelinearna: σ , ε in/ali μ odvisni od E oz. B
- Disperzna: ε odvisen od ω , učinek odbojev
- Nedisperzna: ε neodvisen od ω
- Izotropna: ε skalar, \mathbf{E} in \mathbf{D} vzporedna
- Neizotropna: ε tenzor, \mathbf{E} in \mathbf{D} nevzporedna
- Recipročna: slabljenje vala neodvisno od smeri
- Nerecipročna: slabljenje vala odvisno od smeri

Dielektrična konstanta – lomni količnik n

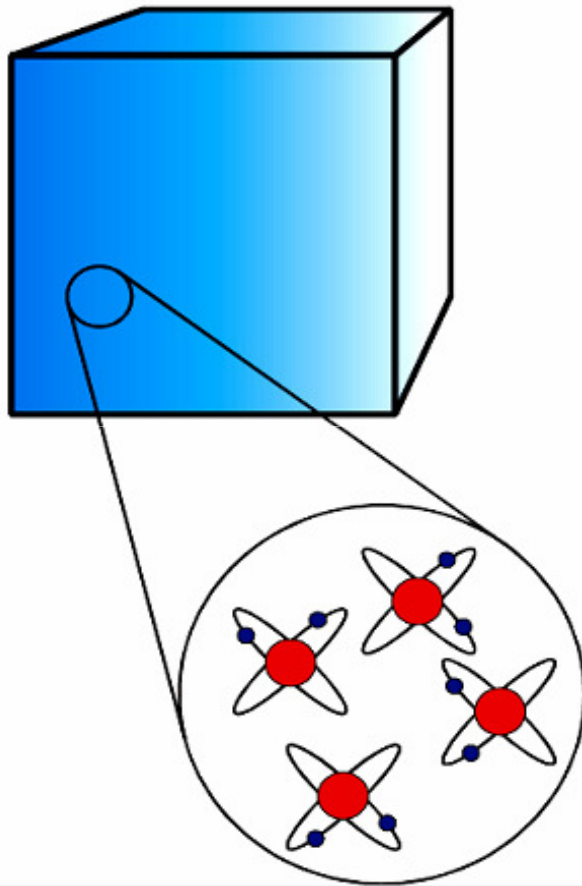
$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

- Naravni materiali: $n > 0$, pozitivna lomnost
 - $\epsilon_r > 0$; $\mu_r > 0$ običajna snov
 - $\epsilon_r < 0$; $\mu_r > 0$ plazma, ionosfera
 - $\epsilon_r > 0$; $\mu_r < 0$ nekateri magnetiki
- Umetni materiali: $n < 0$, negativna lomnost
 - $\epsilon_r < 0$; $\mu_r < 0$ metamateriali, odvisnost od oblike

Metamateriali so skladni z Maxwellovimi enačbami in imajo neobičajne, med njimi uporabne (?) lastnosti.

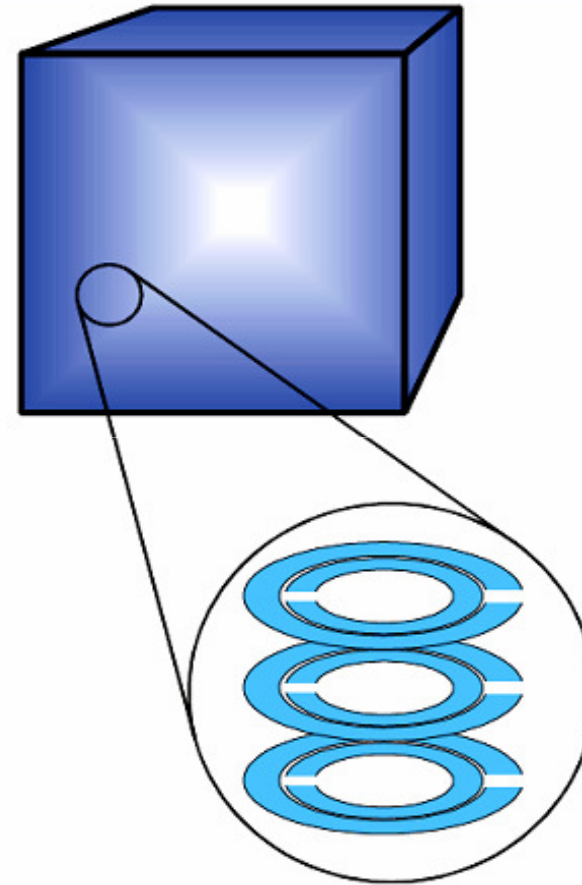
Naravni material in metamaterial

Naravni material



Atomska zgradba snovi
Velikost delcev (molekul)
 $\ll \lambda$

Metamaterial



Zgradba strukture materiala
Velikost delcev (perioda strukture)
 $\leq \lambda$

Metode

- Elektromagnetne:

Maxwellove enačbe, **valovna enačba**, električno in magnetno polje, **mejni pogoji**, profil lomnega količnika, valovno polje, širjenje, **evanescentno polje**, superpozicija in recipročnost, valovna interakcija svetlobe s snovjo, sevanje.

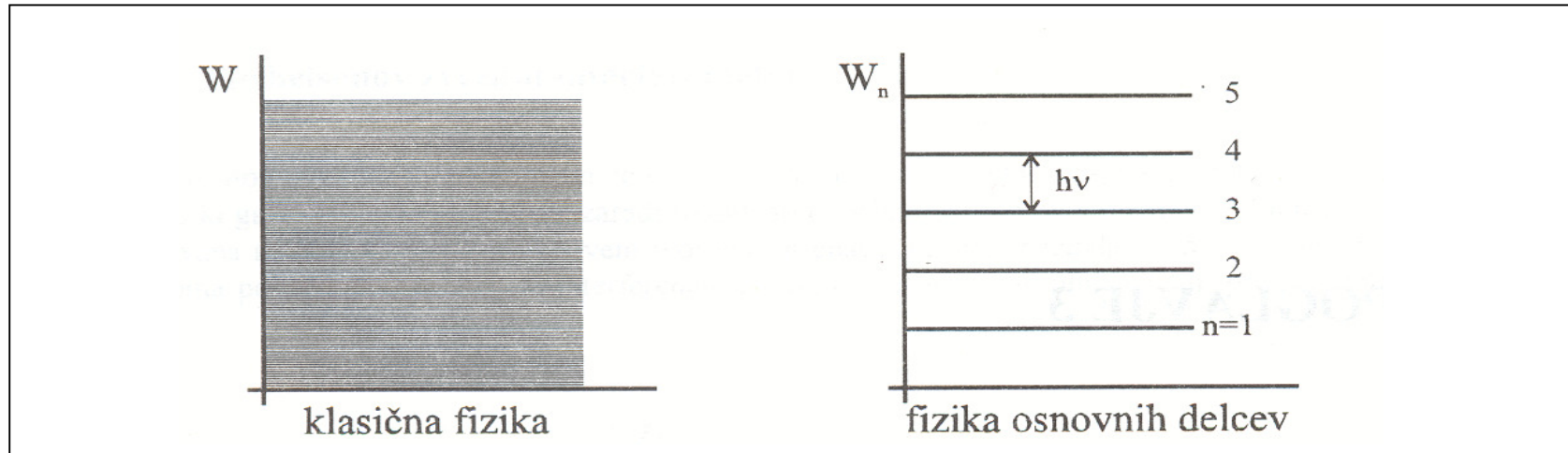
- Kvantne:

Enačbe kvantne fizike, **valovna enačba**, energija, gibalna količina, potencial profil, **tunelski pojav**, kvantna interakcija svetlobe s snovjo, sevanje in detekcija.

- Principi:

Princip stacionarne faze, Fermatov princip.

Vrste elektromagnetnega polja



- Klasično polje: energija porazdeljena zvezno
- Kvantno polje: energija porazdeljena diskretno
- **Koherentno: signal, seštevek polja, interferenca**
- **Nekoherentno: šum, seštevek polja, interference**
- Eno(mono)frekvenčno: nosilnik
- Več(poli)frekvenčno: moduliran nosilnik

Dualna narava svetlobe

Phenomena	Explainable in terms of waves	Explainable in terms of particles
Reflection	✓	✓
Refraction	✓	✓
Interference	✓	x
Diffraction	✓	x
Polarization	✓	x
<i>Blackbody radiation</i>	x	✓
<i>Photoelectric effect</i>	x	✓
<i>Compton effect</i>	x	✓

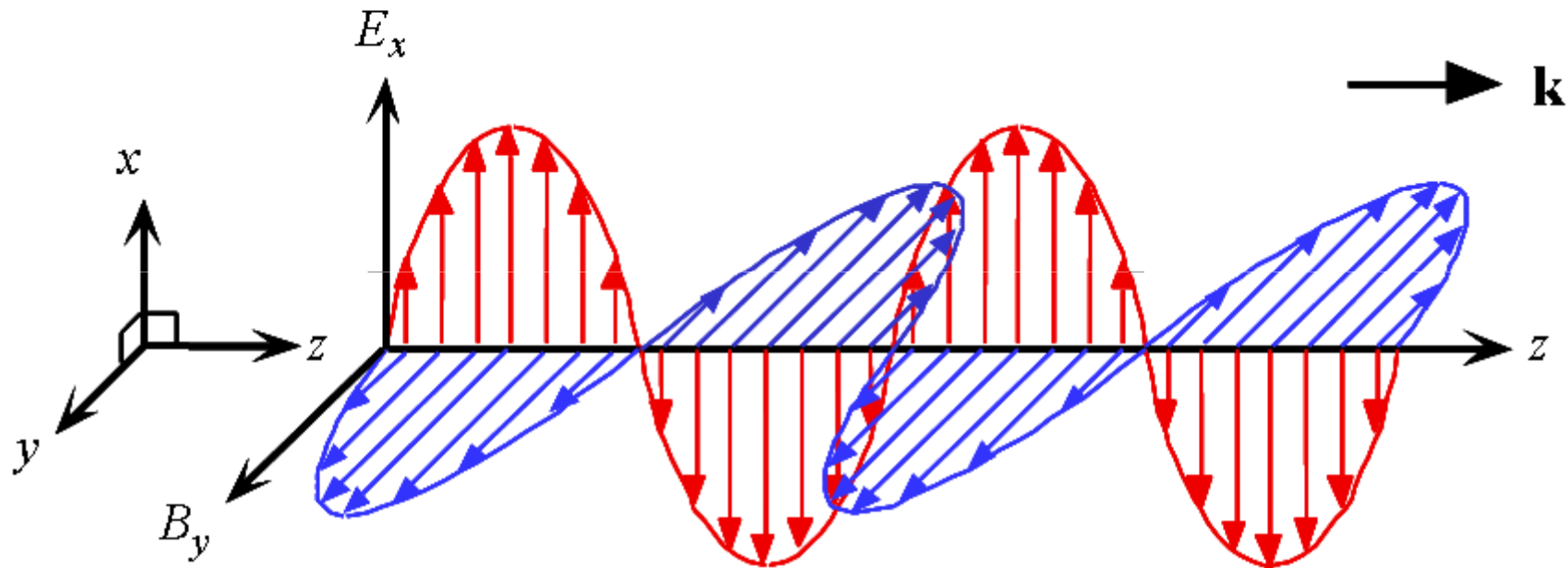
Valovi in umetnost



Polje ravninskega vala

Električna poljska jakost

Magnetna poljska jakost



Linearno polariziran ravninski val:

- smer širjenja (vektor \mathbf{k} v smeri z), hitrost širjenja $v = c/\epsilon$
- ekvifazne ploskve ravnine $z = \text{konst.}$
- polarizacija (krajevno-časovna odvisnost električnega polja), linearna v smeri x

Komponente polja ravninskega vala

$$\vec{E} = e_x E_{0x} \cos(\omega t - kz)$$

$$\vec{H} = e_y H_{0y} \cos(\omega t - kz)$$

$$\omega = 2\pi f :$$

$k :$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} :$$

$$\eta = \frac{E_{0x}}{H_{0y}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} [\Omega] :$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} [\text{m/s}] :$$

vektor električnega polja

vektor magnetnega polja

krožna frekvenca

valovno število, fazna
konstanta

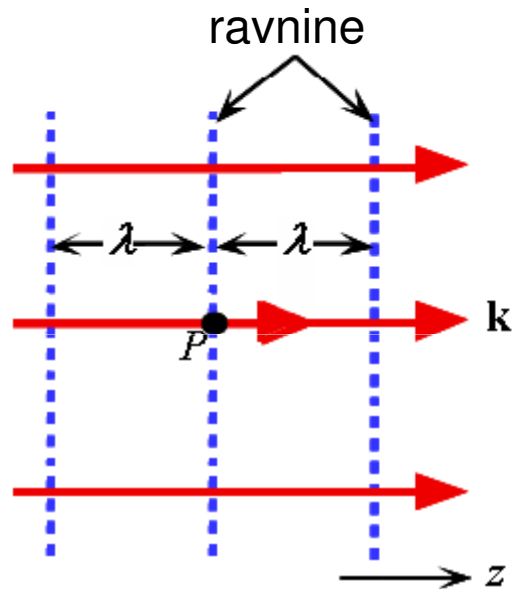
valovna dolžina

valovna impedanca

hitrost širjenja

Valovi in valovne fronte

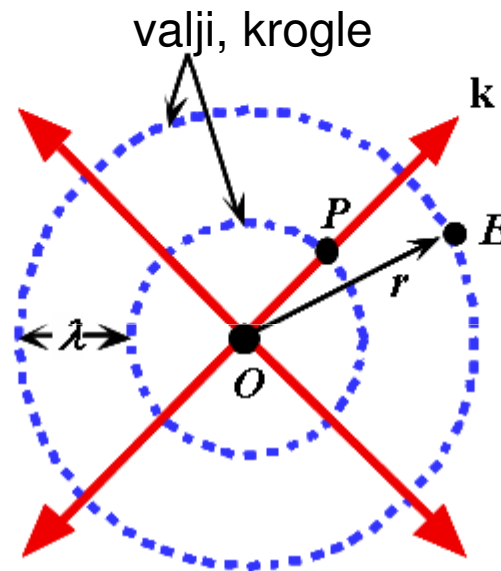
Ravninski val



Ekvifazne ploskve:
vzporedne ravnine

Smer širjenja:
vzporedne premice

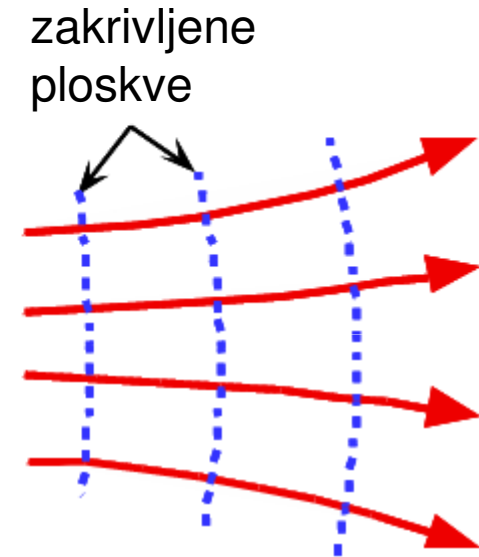
Valjni, krogelni val



Ekvifazne ploskve:
valji, krogle

Smer širjenja:
radialne premice

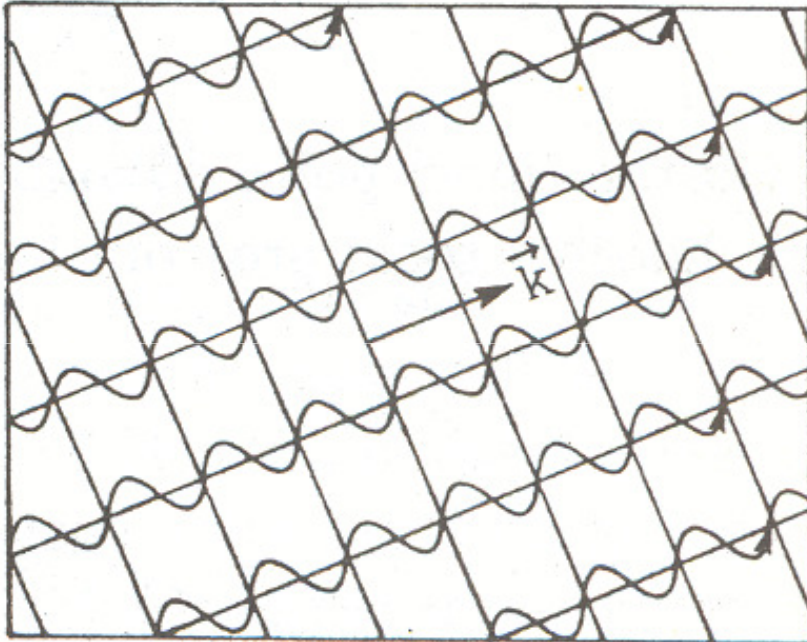
Divergenten val



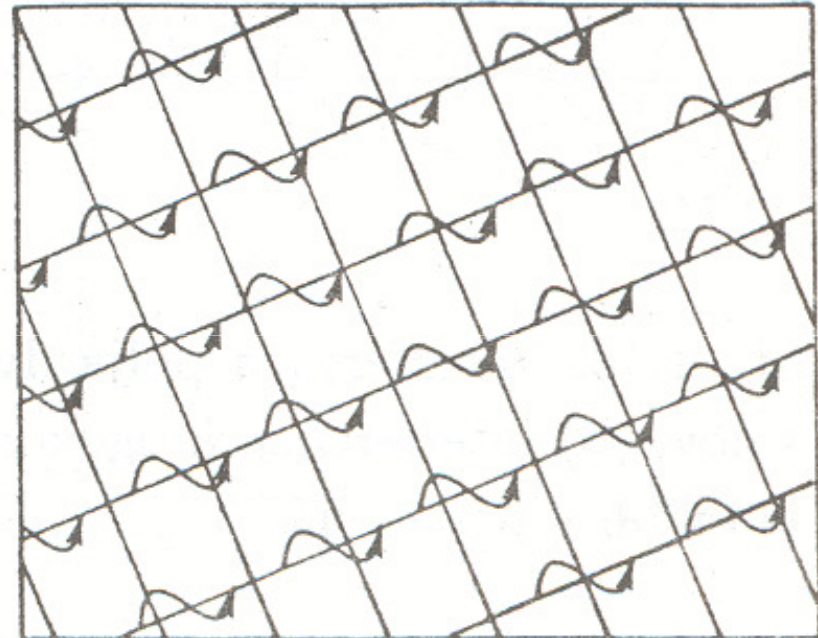
Ekvifazne ploskve:
zakrivljene ploskve

Smer širjenja:
ukrivljeni žarki

Koherentni in nekoherentni ravninski val



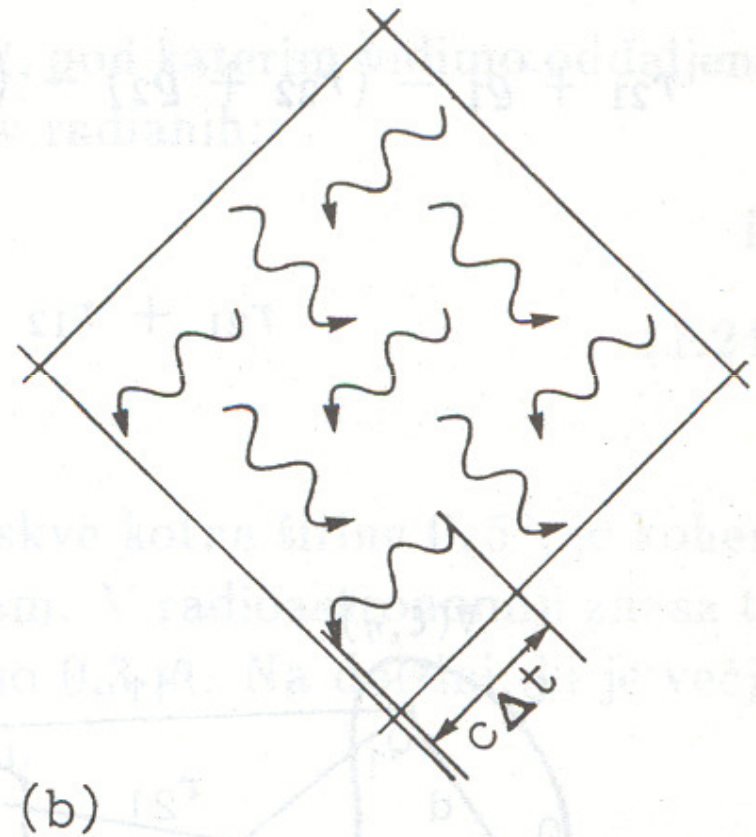
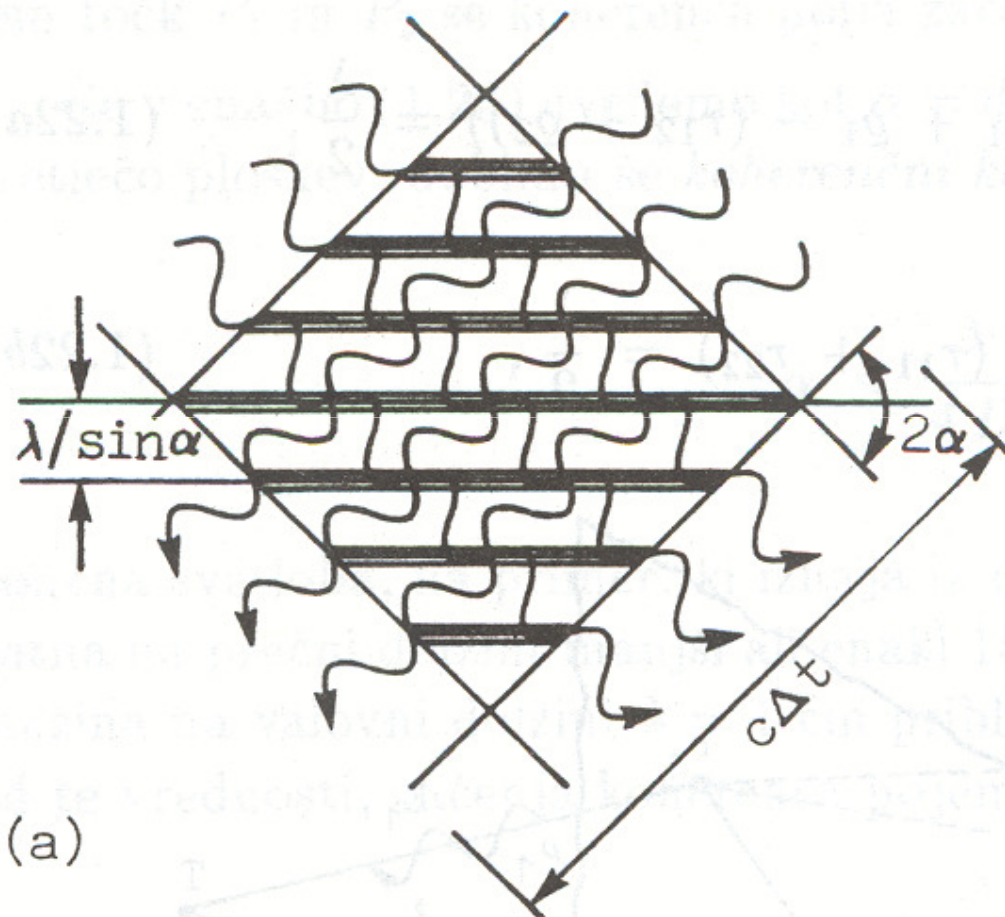
Koherentni val - dolgi valovni paketi



Nekoherentni val – kratki paketi

Merilo za koherenco je koherenčna dolžina vala (koherenčni čas)

Koherentna in nekoherentna interferenca



Rodovi (načini) elmg. valovanja

Kovinski dvovod (dvovodniška linija):

- Transverzalno elektromagnetni (TEM)

Kovinski valovod:

- Transverzalno električni (TE ali H)
- Transverzalno magnetni (TM ali E)

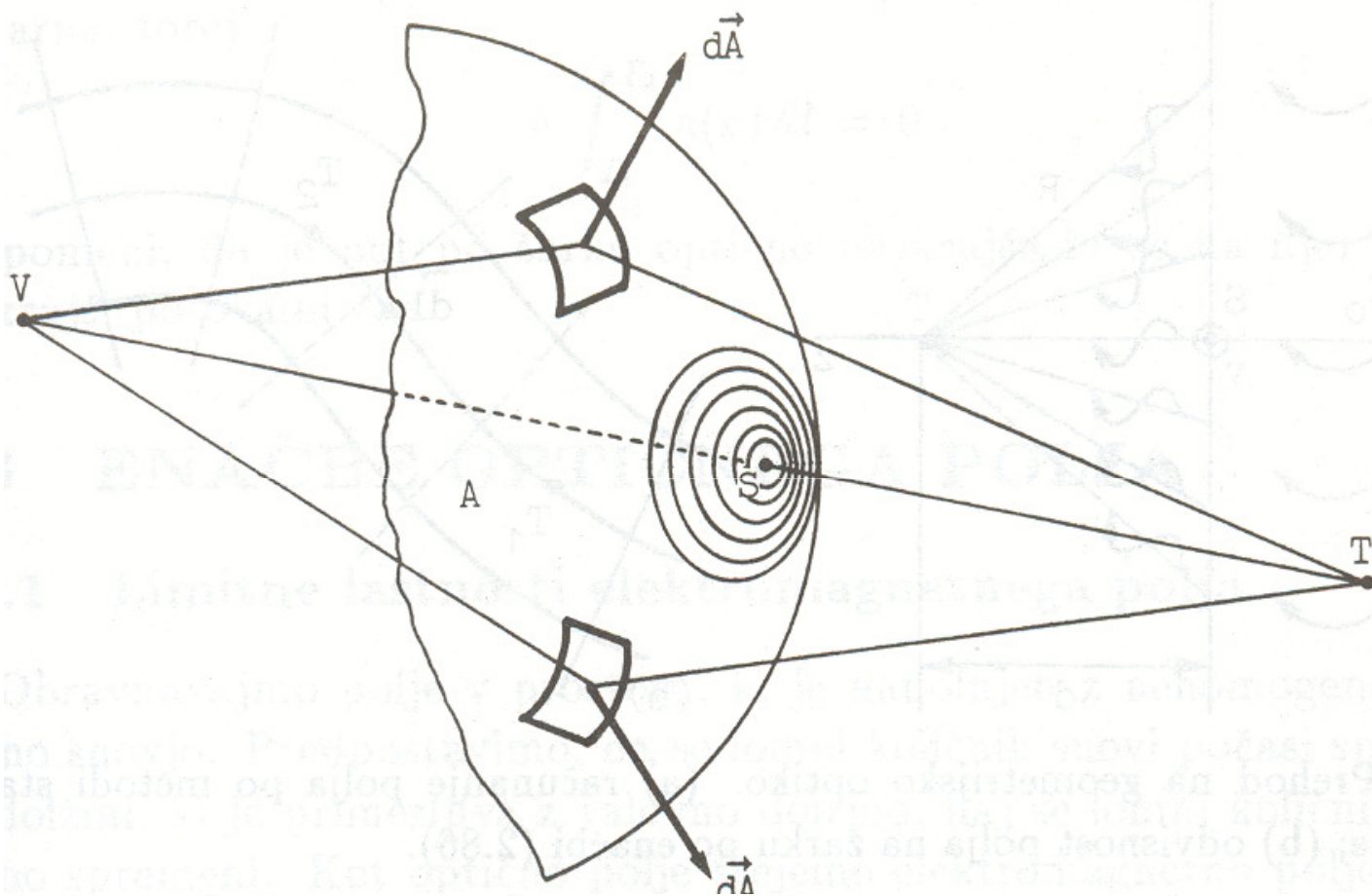
Dielektrični valovod:

- Hibridni valovi (EH in HE)

Osnove razširjanja

- Metode valovne optike
- Pogoji prečne resonance
- Princip stacionarne faze
- Fermatov princip
- Huygensov princip
- Fresnel–Kirchhoffov in Fraunhoferjev približek
- Fresnelove cone za direktno širjenje, odboj in lom
- Prehod na geometrijsko (žarkovno) optiko
- Kombinacija metod valovne in geometrijske optike

Princip stacionarne faze



$$I \doteq \frac{2\pi}{k \sqrt{|\phi''_{xx}\phi''_{yy}|}} A(x_s, y_s) e^{-jk\phi(x_s, y_s)} e^{j\frac{\pi}{4}\left(\frac{\phi''_{xx}}{|\phi''_{xx}|} + \frac{\phi''_{yy}}{|\phi''_{yy}|}\right)}.$$

Elektromagnetni valovi

Oblika ploskve enake faze (ekvifazne ploskve):

1. Ravninski (planarni) valovi
2. Valjni (cilindrični) valovi
3. Krogelni (sferični) valovi

Način širjenja:

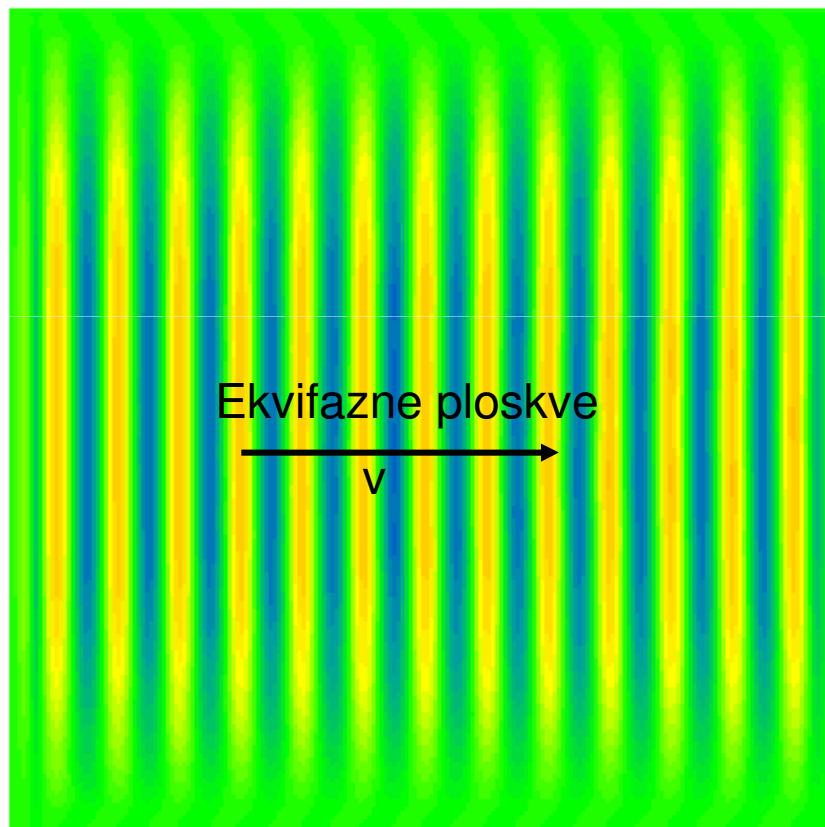
4. Valovi v prostem prostoru
5. Valovi v planarnem valovodu
6. Valovi v cilindričnem valovodu in drugo

Material vodnikov:

7. Kovinski valovodi
8. Dielektrični valovodi

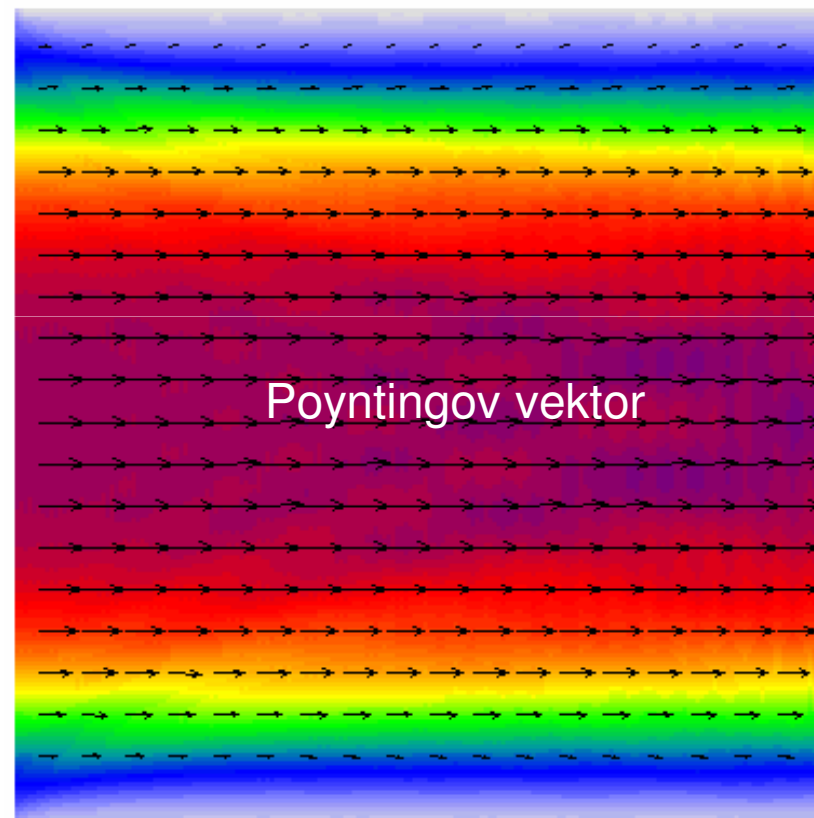
Ravninski val

Prikaz jakosti polja



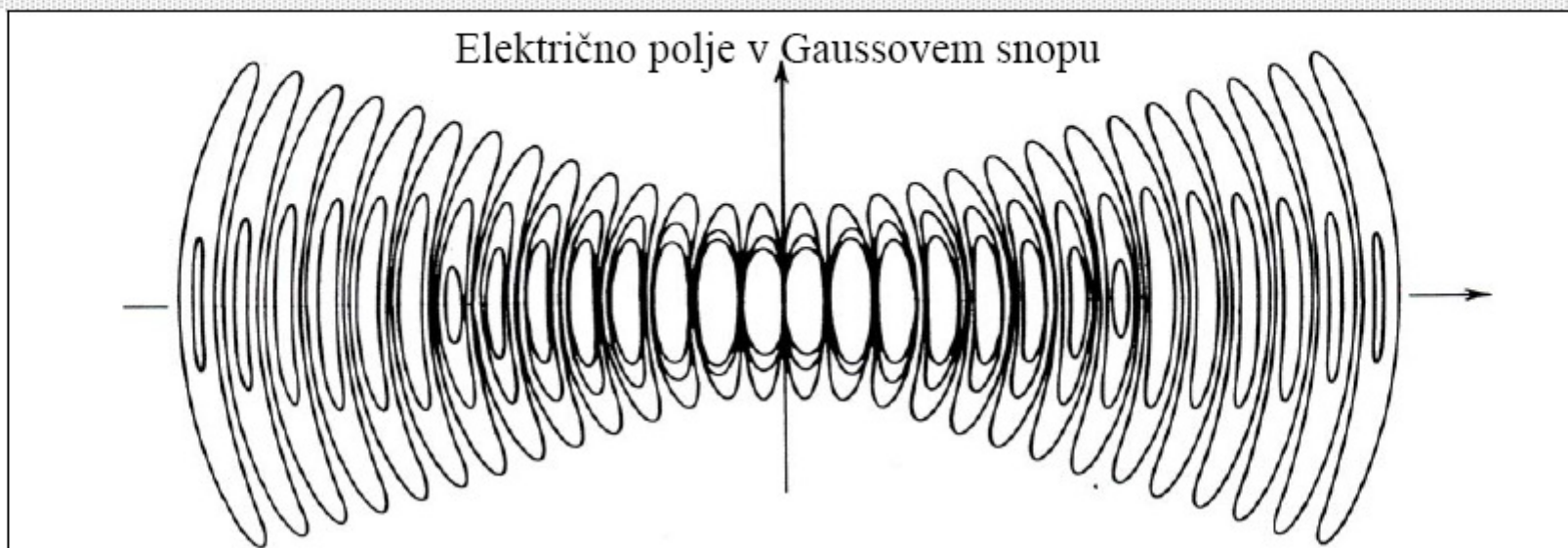
Širok (več λ) žarek

Prikaz toka povprečne gostote moči



$$S = E^2/2Z_0$$

1.2 ELEKTROMAGNETNO (SVETLOBNO) POLJE



- poljska jakost monokromatskega polja:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left(\vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t} + \vec{E}^*(\vec{r}) e^{-j\omega t} \right) = \text{Re} \left[\vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right]$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left(\vec{H}(\vec{r}) e^{j\omega t} + \vec{H}^*(\vec{r}) e^{-j\omega t} \right) = \text{Re} \left[\vec{H}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right]$$

- gostota moči:

$$\vec{S}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t), \quad \text{W/m}^2$$

- časovna povprečna gostota moči:

$$\overline{\vec{S}}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r}) / 2, \quad \text{W/m}^2$$

- val TEM v praznem prostoru ($\vec{H}_0 = \vec{1}_k \times \vec{E}_0 / Z_0$):

- poljska jakost ravninskega vala:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{E}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right]$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\vec{H}_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right]$$

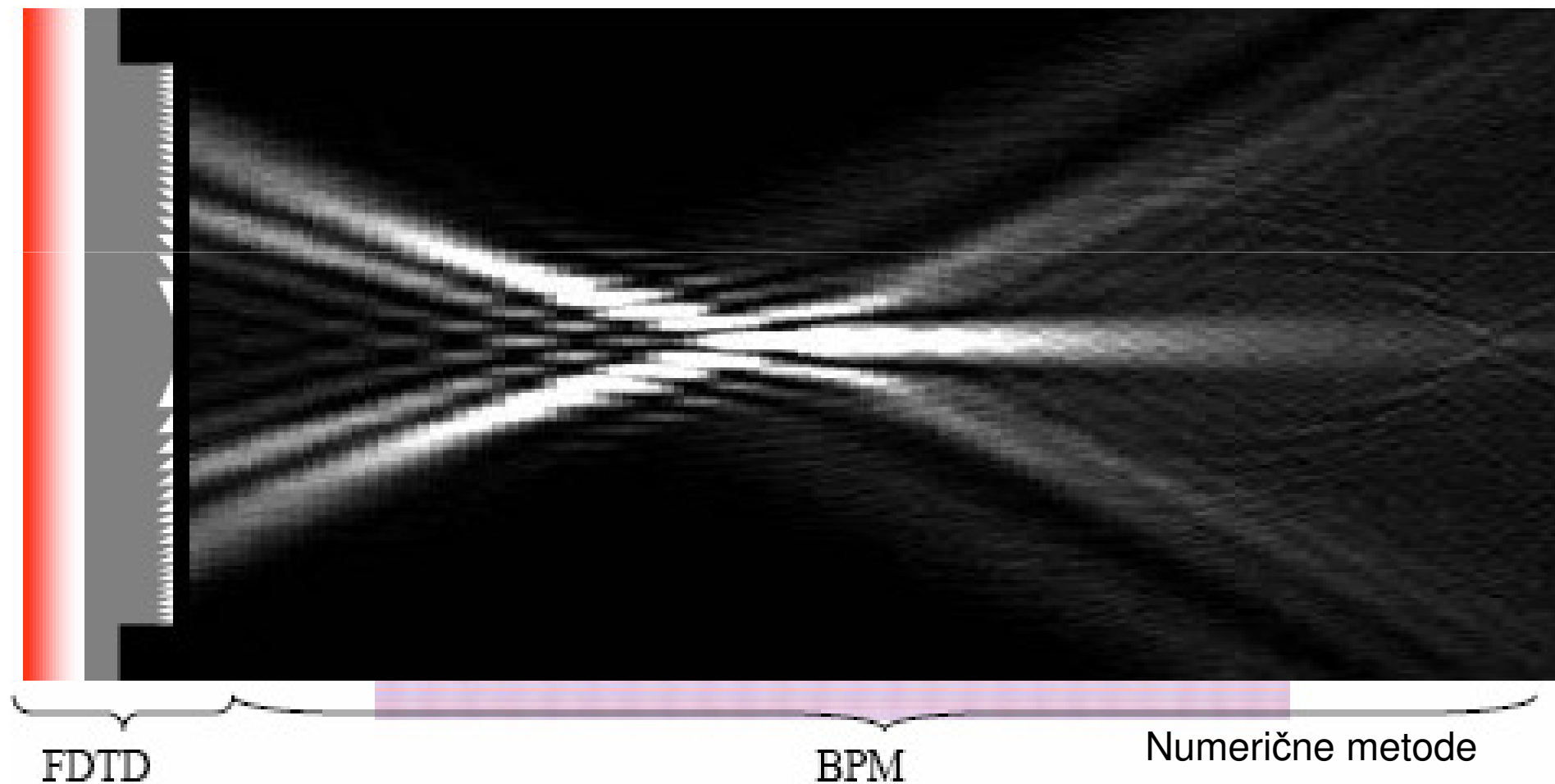
- polarizacija:

$$\vec{1}_E(\vec{r}, t) = \frac{\vec{E}(\vec{r}, t)}{|E(\vec{r}, t)|}$$

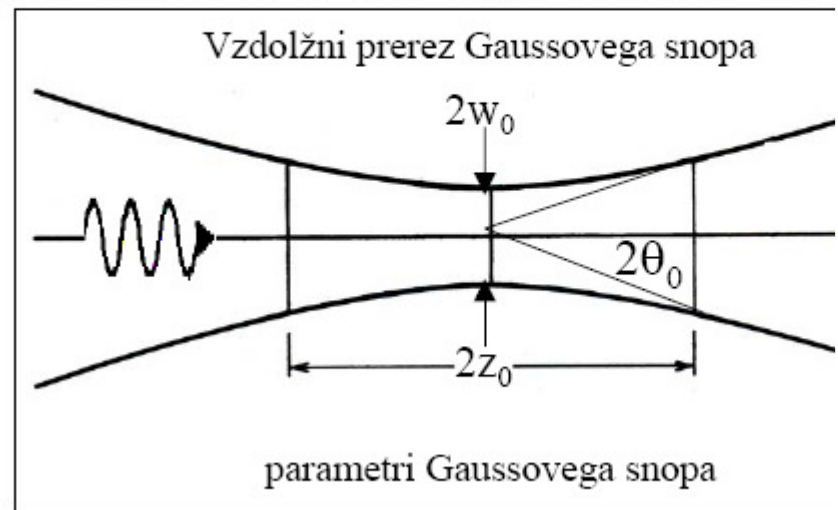
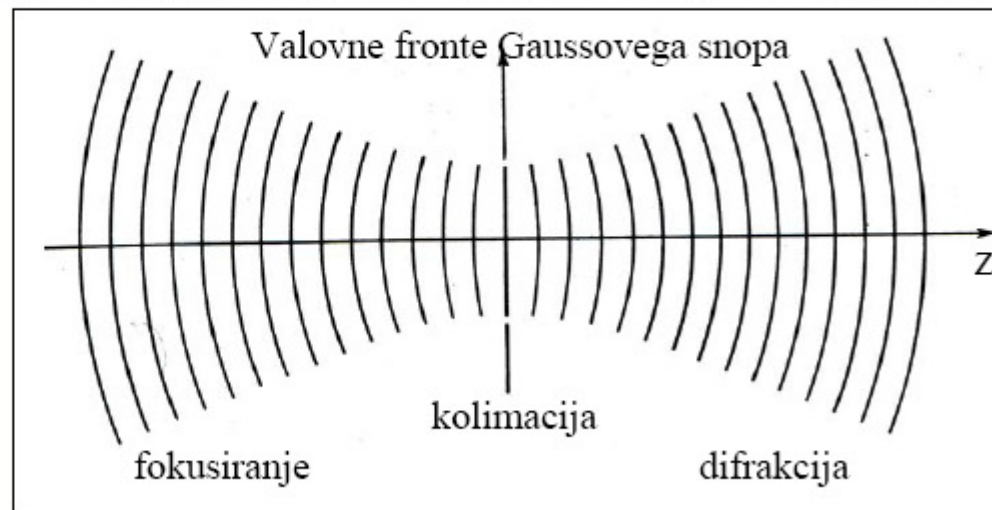
$$\vec{1}_E(\vec{r}) = \frac{\vec{E}(\vec{r})}{|E(\vec{r})|}$$

- razmerje poljskih jakosti vala T

Gaussov snop



1.6 OPTIČNA VALOVANJA - GAUSSOV SNOP



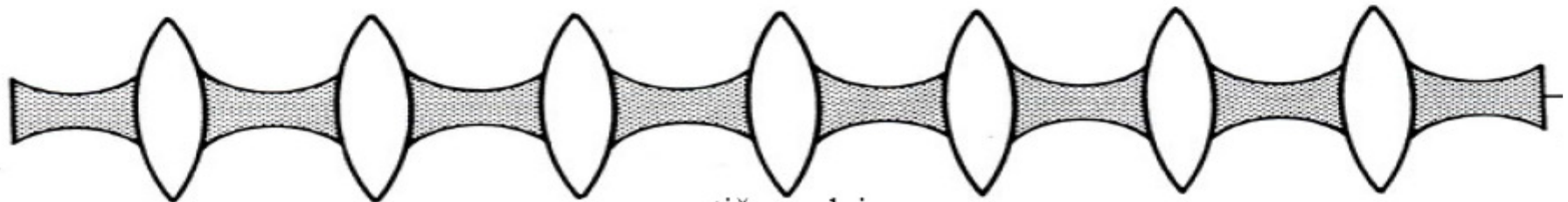
Optični žarek skozi homogeno snov ima pod vplivom fokusiranja in difrakcije p konvergentnosti in divergentnosti. Val je TEM₀₀

Podatki:

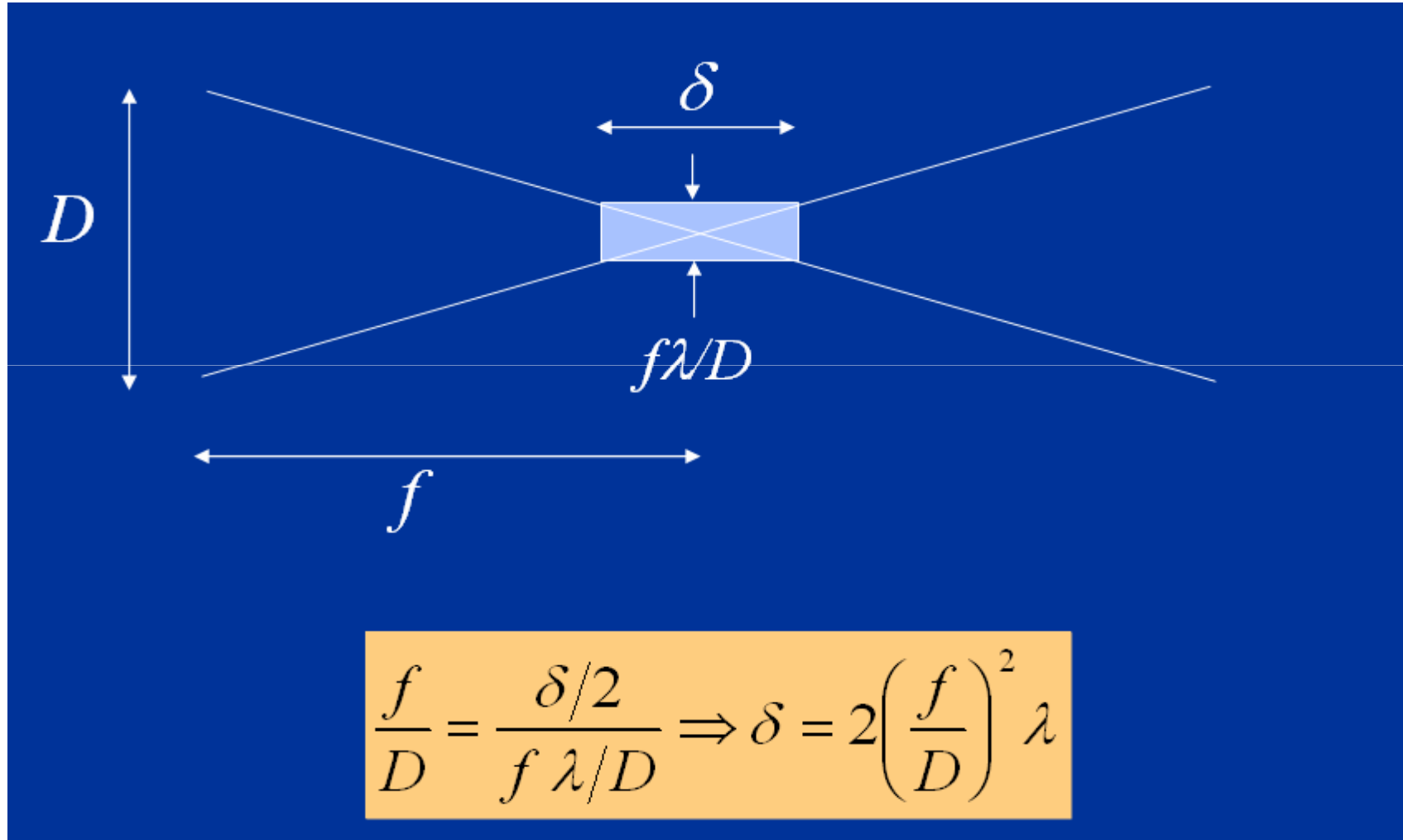
$2\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{w_0}$ vršni kot divergence žarka; konus zajema 86% moči

$2z_0 = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}$ dolžina (globina) fokusa

$2w_0 = 2\theta_0 z_0$ premer žarka v fokusu po kriteriju $1/e^2 = 0,14$ za gostoto n



Fokusiranje (Gaussovega) žarka



Temeljna načela

- Valovni in kvantni značaj svetlobe
 $EE^* \sim$ gostota moči; AA^* verjetnost
- Načelo nedoločljivosti *spekter – čas*
 $\Delta f \Delta t \geq 1/4\pi$ (Fourier), $\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$, $\Delta n \Delta \Phi \geq 1/2$
- Načelo nedoločljivosti *pozicija – gibalna količina*
(Heisenbergovo načelo nedoločljivosti)
 $\Delta x \Delta K \geq 1/2$ ($K=2\pi/\lambda$) $\Delta x \Delta G \geq h/4\pi$

Polarizacijske lastnosti polja

1. Polarizirano polje:

- komponenti vektorja polja v medsebojnem amplitudno-faznem razmerju
- monokromatsko polje, ozkofrekvenčno modulirano polje
- eliptično, linearno, krožno (elipsa: osno razmerje, naklon, smer vrtenja)

2. Delno polarizirano polje:

- polikromatsko polje ožjega spektra, polarizirana in nepolarizirana komponenta
- matrika koherence, koherenčni čas, koherenčna dolžina

3. Nepolarizirano polje:

- polikromatsko polje širokega spektra (npr. naravna svetloba)
- dve naključni, med seboj nepovezani komponenti enake moči

Statistične lastnosti polja

1. Koherentno polje

- monokromatsko
- ozkopasovno

2. Časovna in prostorska koherenca

- stopnja časovne koherence
- stopnja prostorske koherence

3. Nekohetentno polje

- Van Cittert-Zernikeov teorem
- koherenčna matrika

Odboj in razprševanje

Odboj in razprševanje

1. Odboj neresonančni

dimenzije objekta mnogo večje od λ
obravnava: valovna ali geometrijska optika

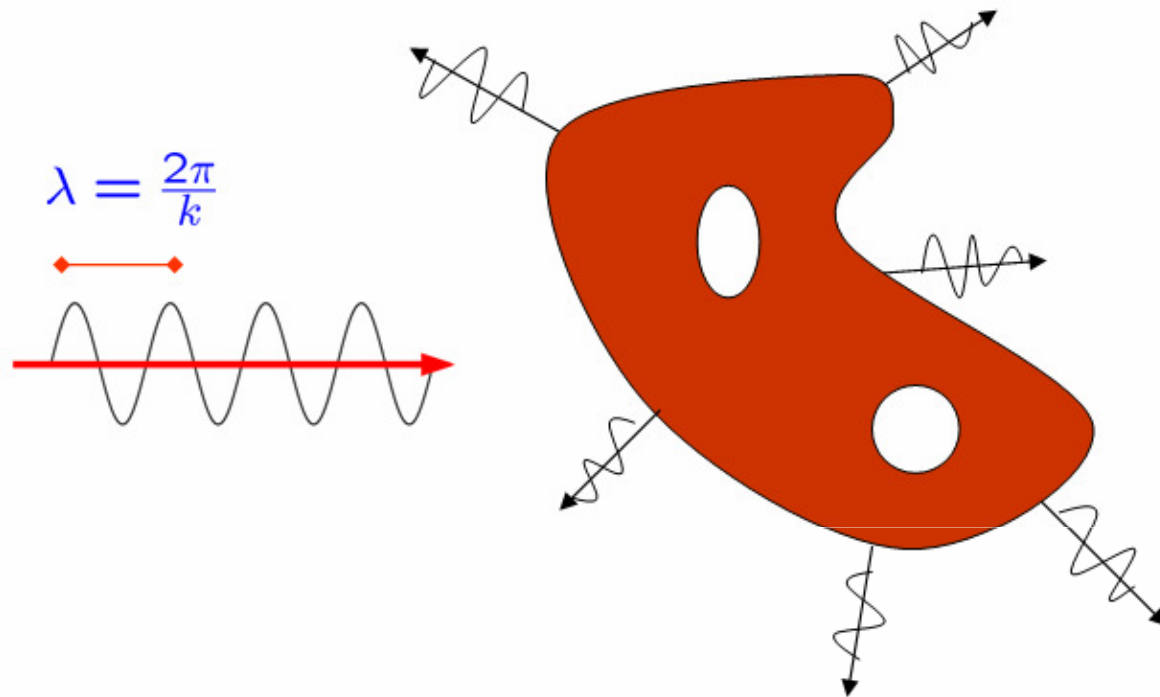
2. Odboj resonančni (Mie)

dimenzije objekta reda λ
obravnava: valovna optika

3. Razprševanje (sipanje)

dimenzije objekta mnogo manjše od λ
značilno Rayleighovo sipanje
obravnava: nanooptika (plazmoni), novo področje optike

Razprševanje (sipanje)



Maxwell Eqns.

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\mathbf{E}} = ik\vec{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \vec{\mathbf{H}} = -ik\vec{\mathbf{E}} \end{cases}$$

Helmholtz Eqn.

$$\Delta u + k^2 u = 0$$

(TE, TM, Acoustic)

Rayleighovo sipanje

Sipanje svetlobe na nanostrukturah:

- sipanje svetlobe v atmosferi na molekulah zraka
- sipanje svetlobe na strukturnih nehomogenostih stekla SiO₂

Sipanje je zelo strmo odvisno od valovne dolžine. S krajšanjem valovne dolžine se povečuje kot $1/\lambda^4$. Je vir prevladujočega slabljenja v SiO₂ optičnem vlaknu.

Uklon

Uklon

1. Uklon skozi odprtino

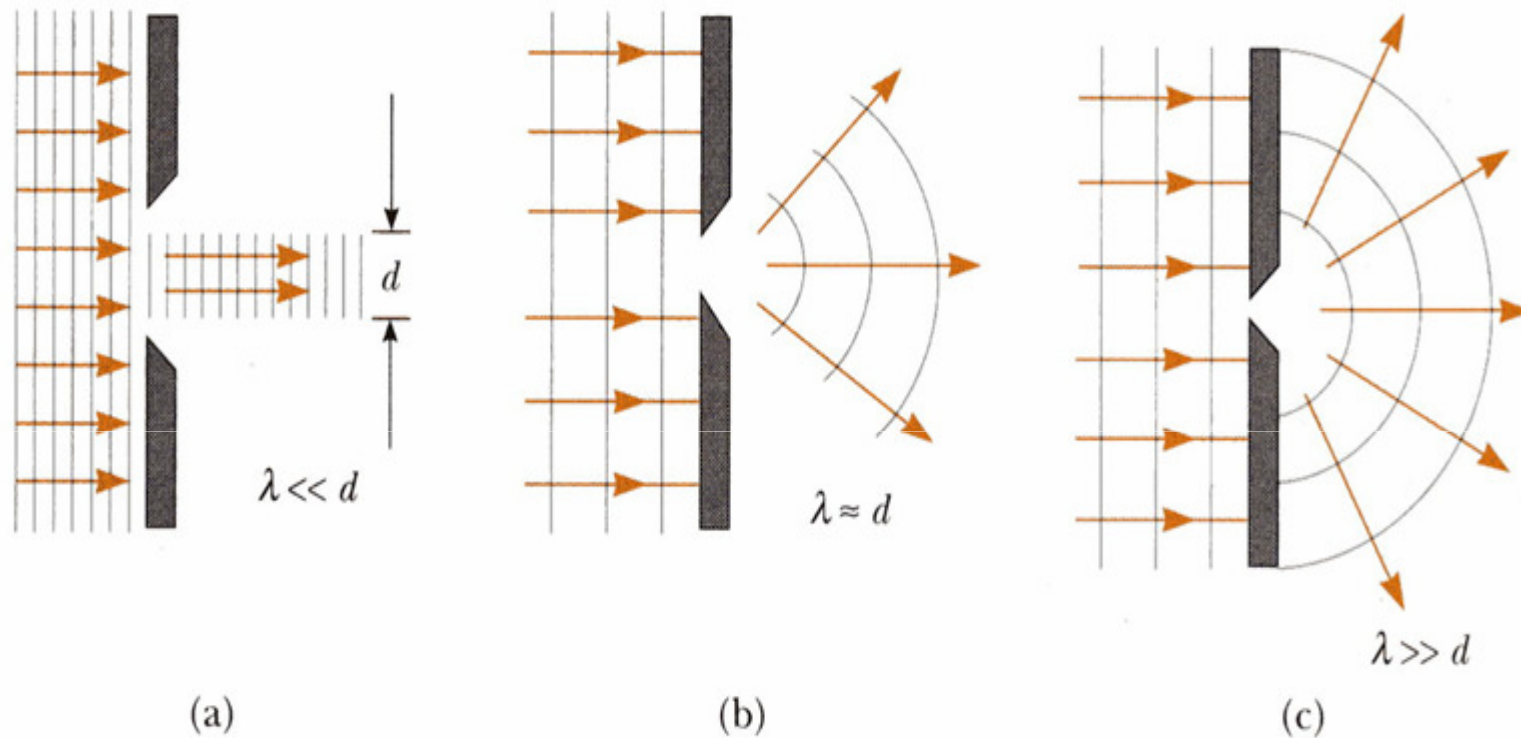
Ploskvice na odprtini so vir sekundarnega valovanja, ki v pristoru interferira in oblikuje uklonjeno polje.

2. Uklon čez oviro (rob, konica predmeta)

Ploskvice na odprtem delu so vir sekundarnega valovanja, se širi onstran ovire.

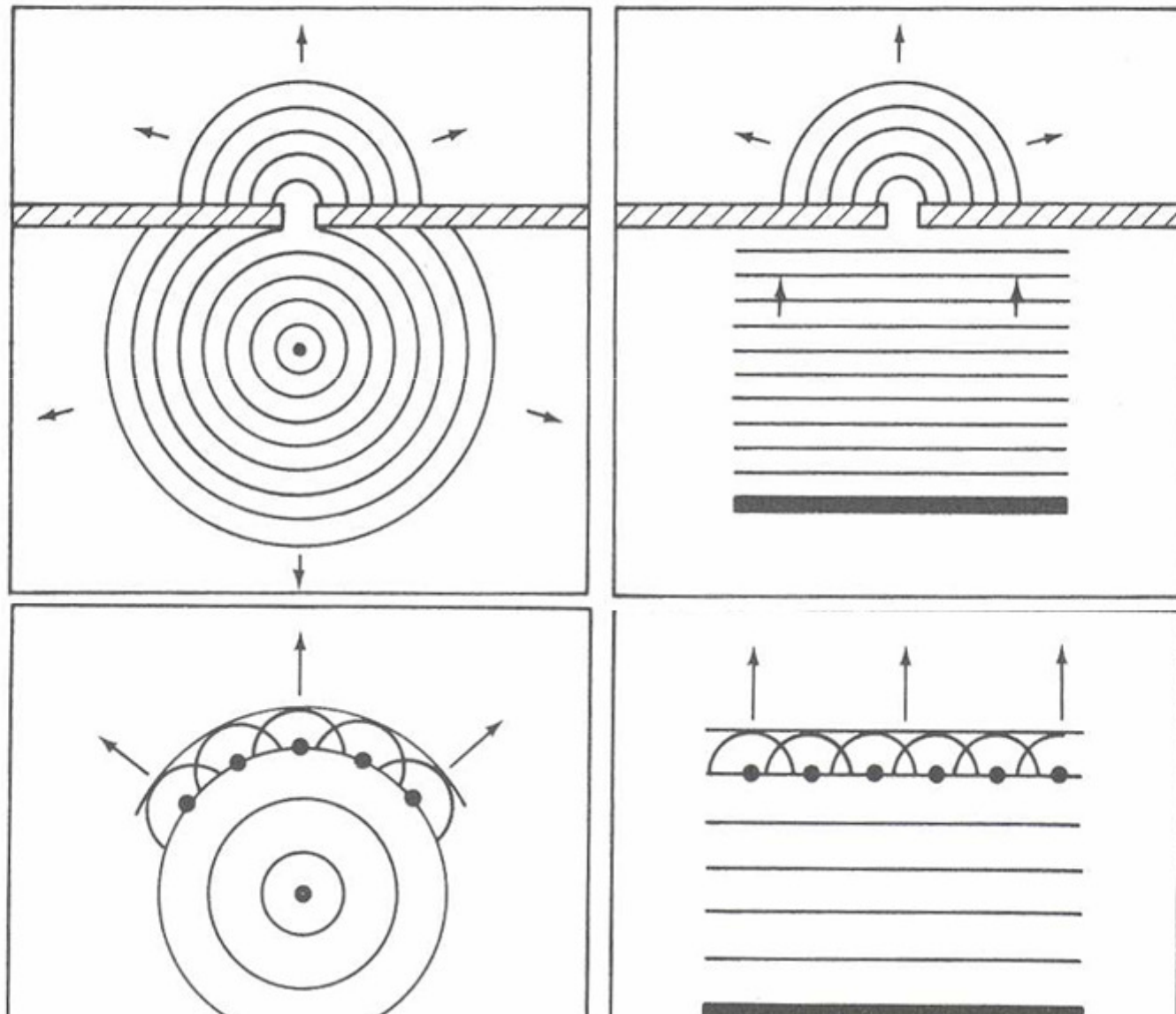
3. Uklon na periodični strukturi (uklonski mrežici)

Uklon na odprtinah



- Skozi večjo odprtino prehaja ravninski val
- Skozi majhno odprtino prehaja krogelni val

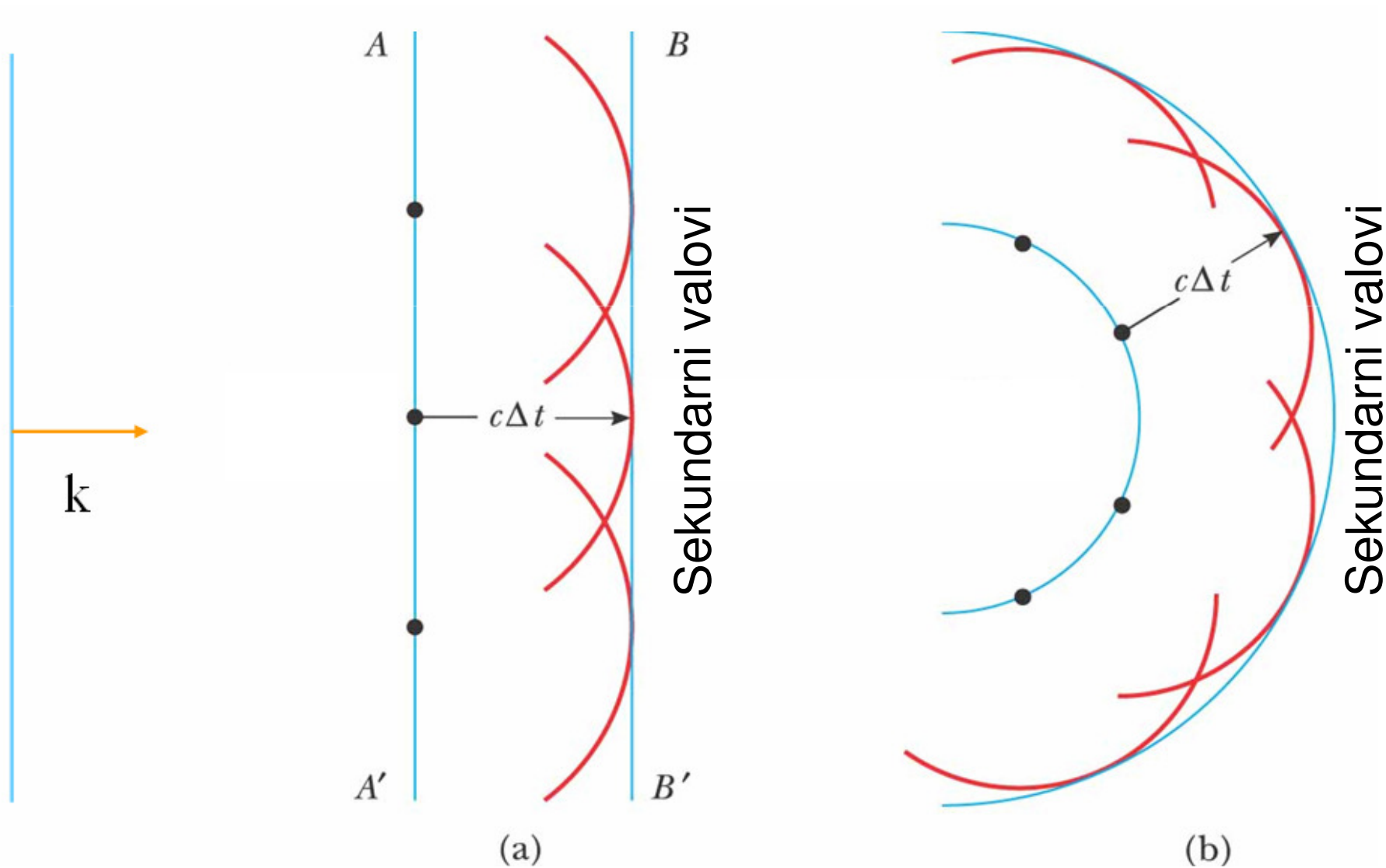
Huygens' Principle



Huygensov princip

Ravninski val

Krogelni val



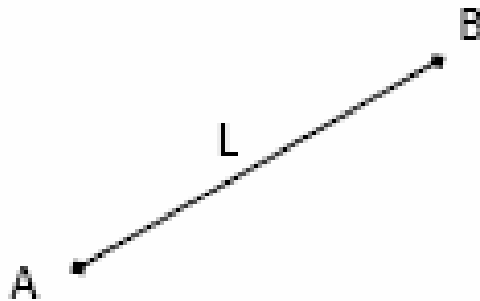
Odboj, lom

totalni odboj

Fermatov princip

Svetloba potuje od A do B po optično najkrajši poti $n \times ds$ oz v najkrajšem času

a) $n = \text{constant}$
Raven žarek

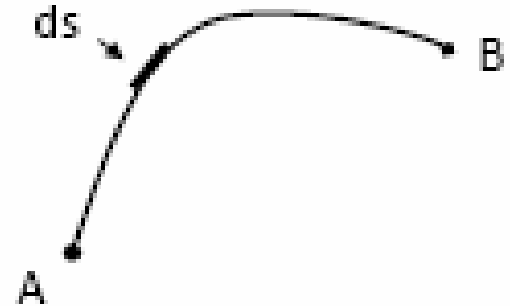


$$v = \frac{c}{n}$$

$$\text{Time: } t_{AB} = \frac{L}{v} = \frac{1}{c} nL$$

→ straight line

b) $n = n(\vec{r}) = \text{function of position}$
Ukrivljen žarek

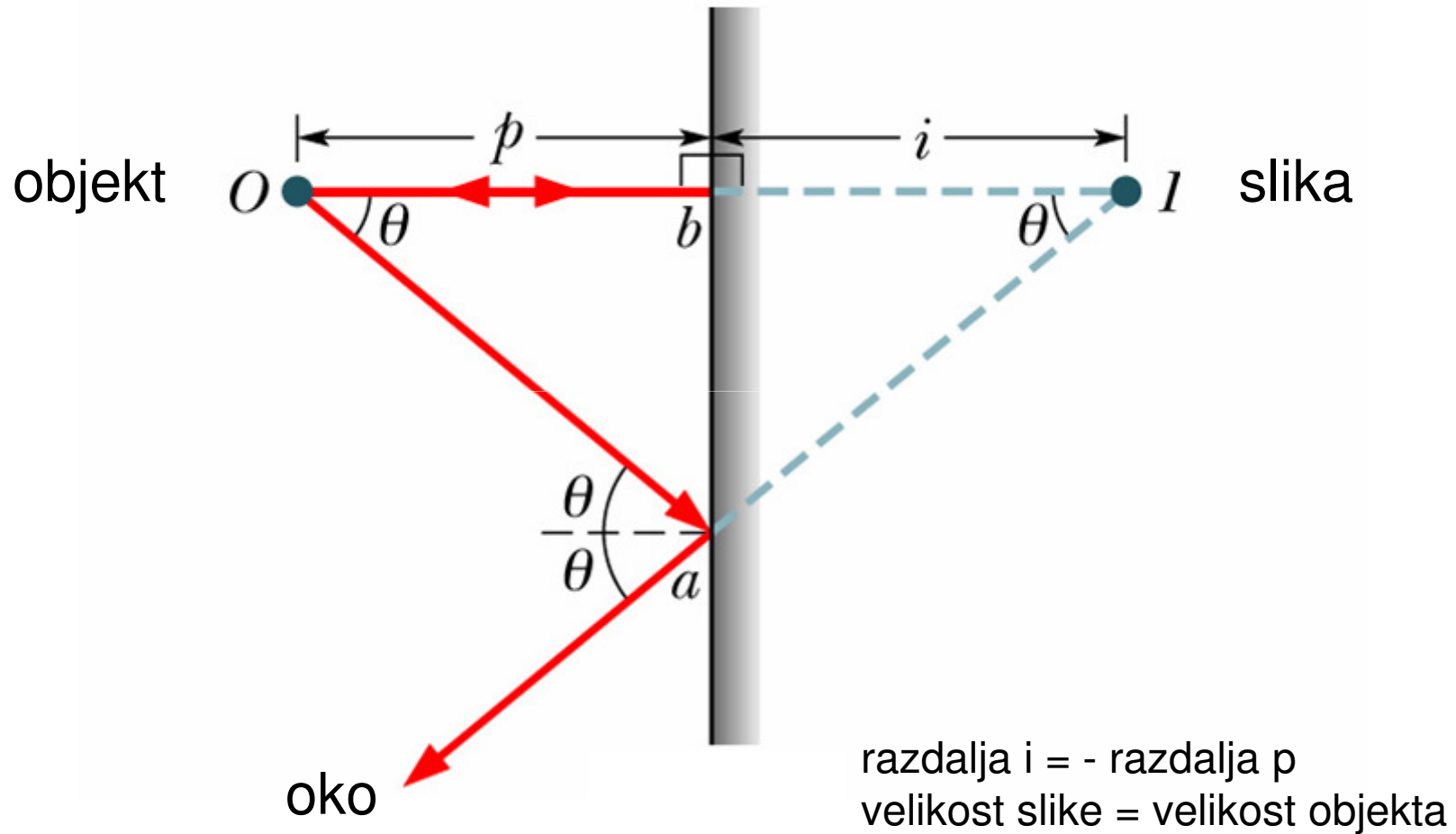


$$v(r) = \frac{c}{n(r)}$$

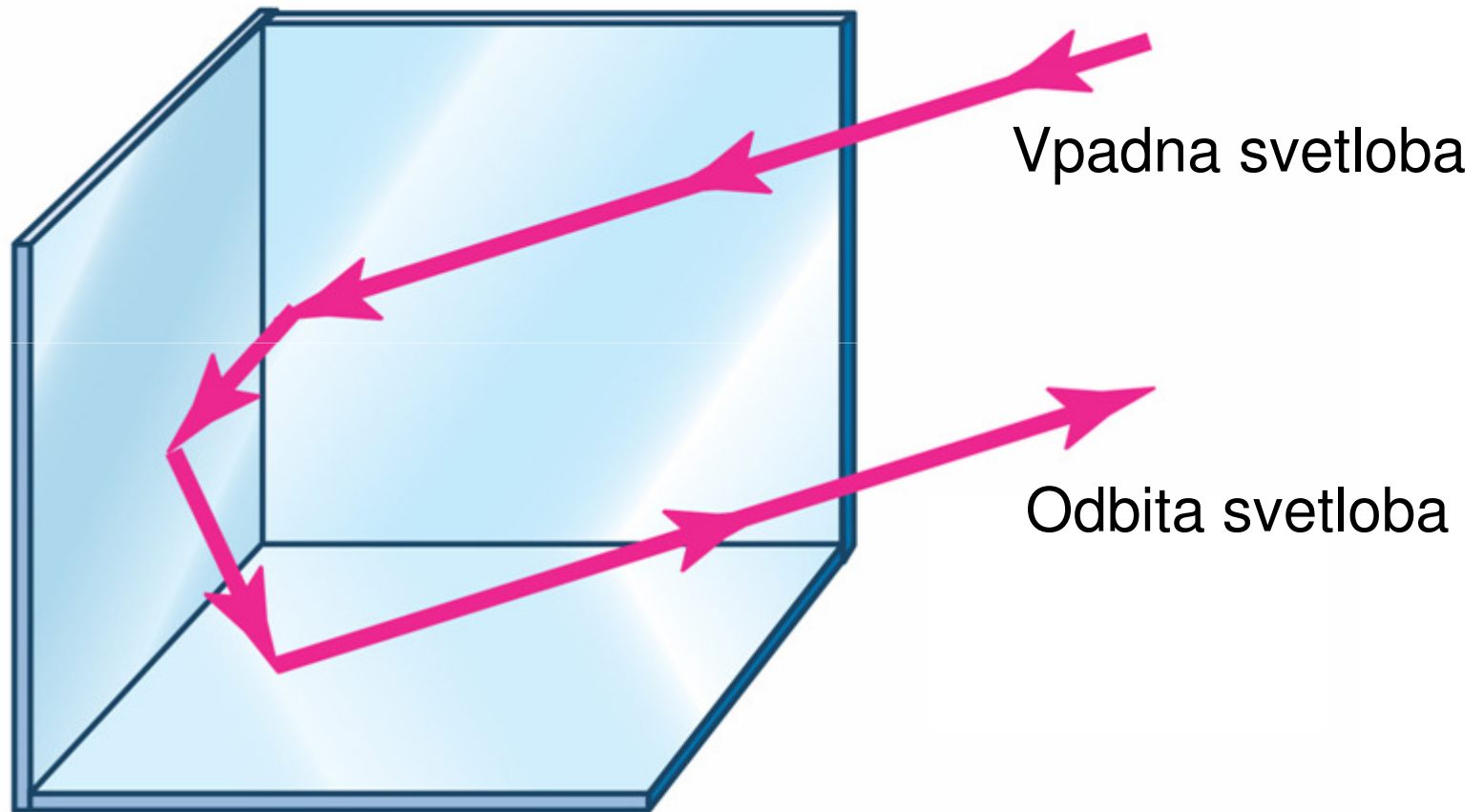
$$dt = \frac{ds}{v_B} = \frac{1}{c} n(s) ds$$

$$\rightarrow \boxed{t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B n(s) ds}$$

Odboj od ravnega zrcala

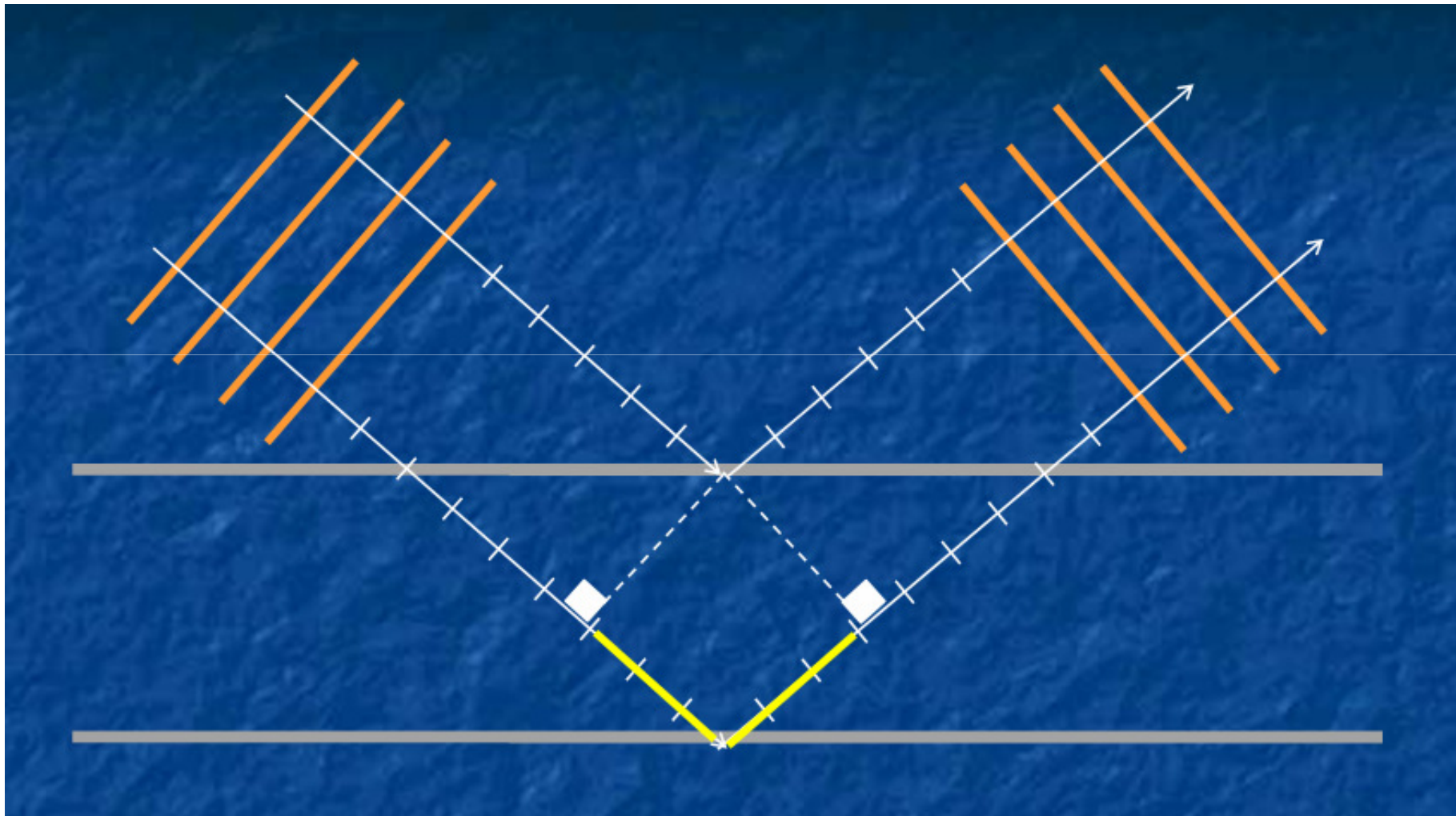


Trirobni reflektor



Trirobni reflektor odbija retrodirektivno.

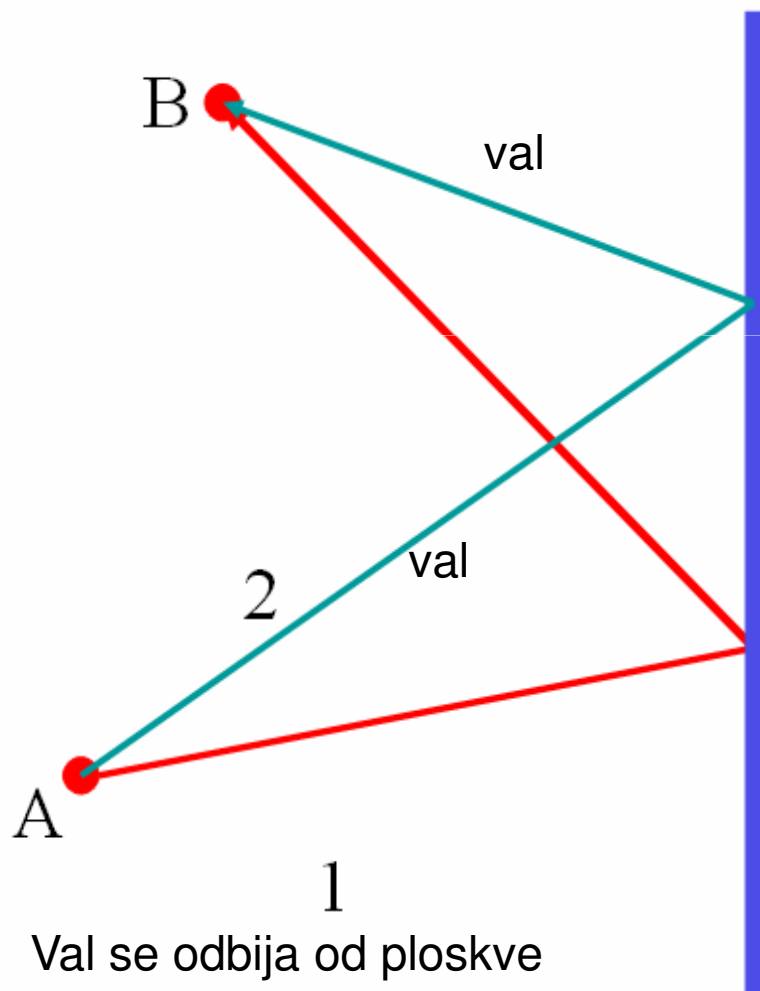
Odboj od dveh plasti



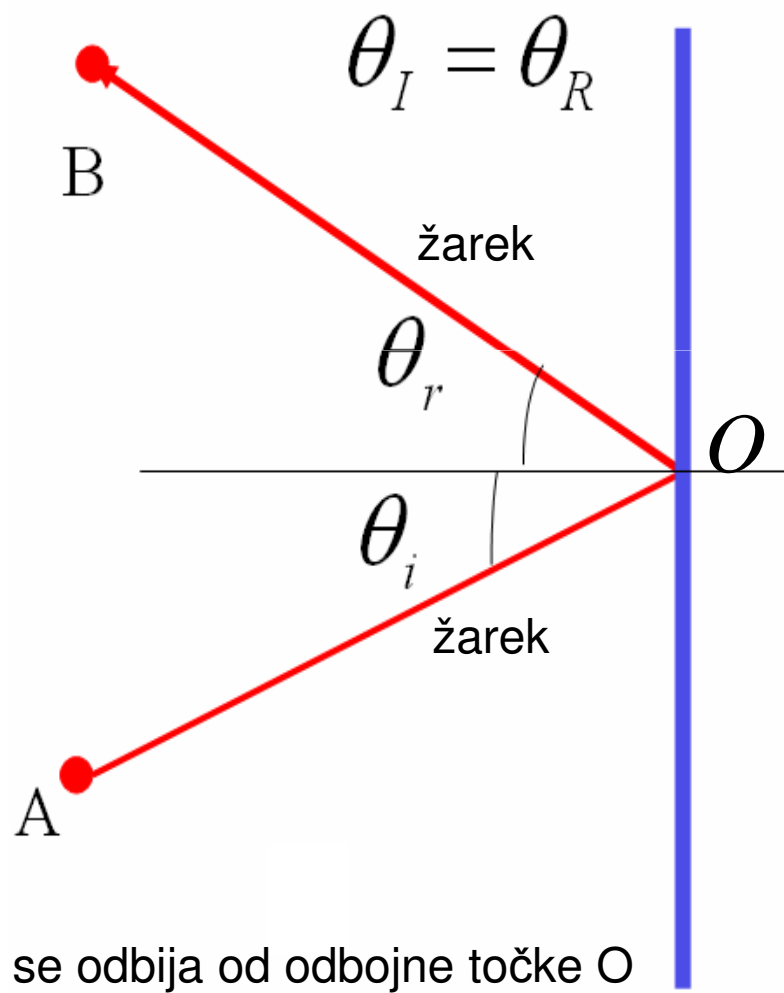
Večplastni odboj je osnova za periodične strukture

Odboj

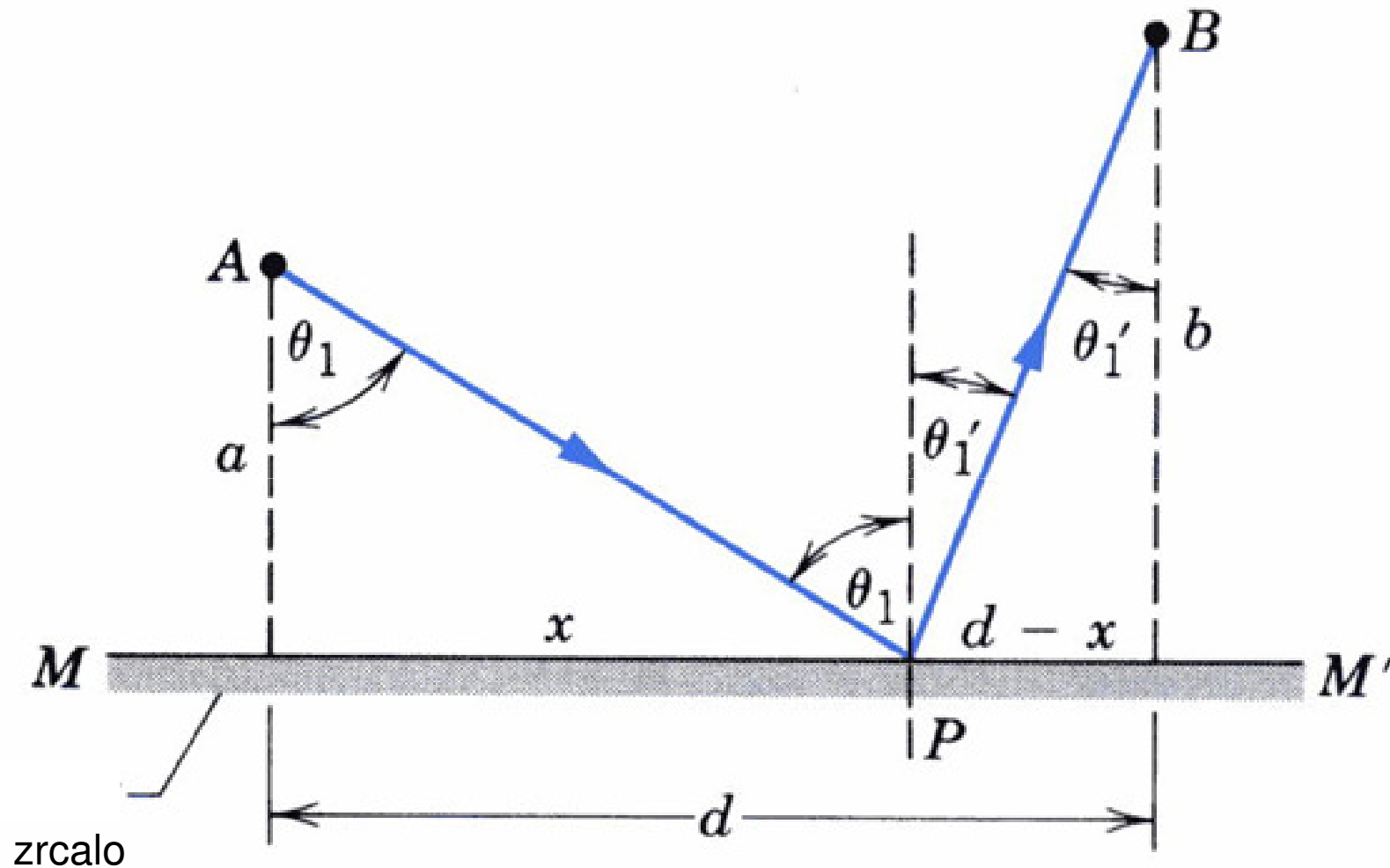
Valovna optika:



Geometrijska optika:

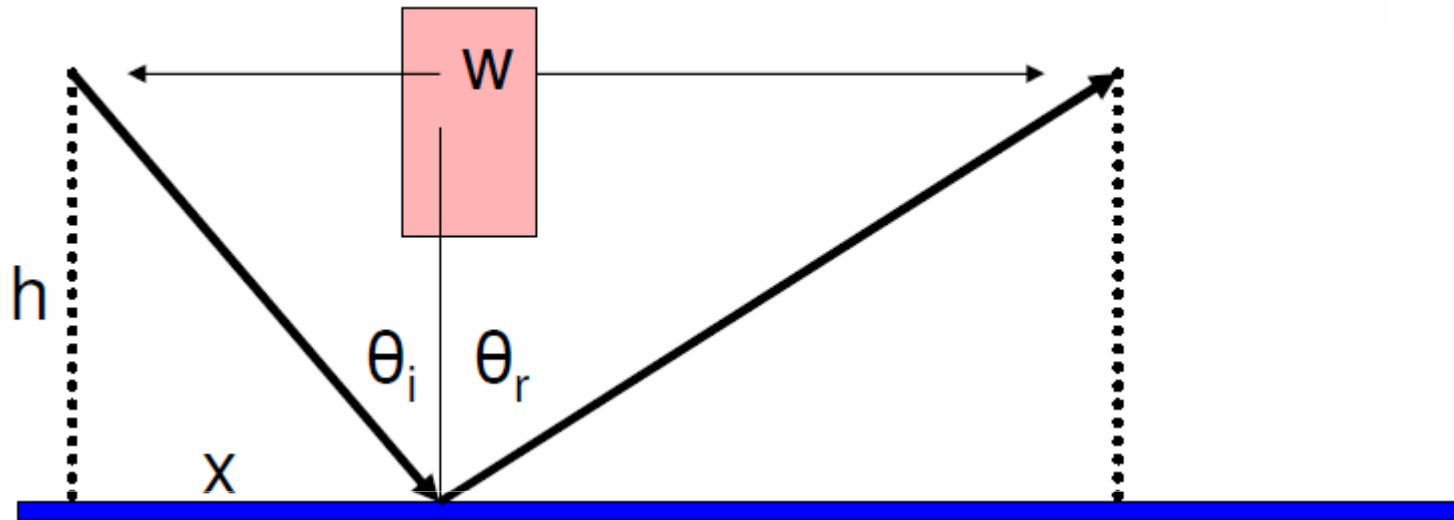


Fermatov princip



Optična pot (seštevek dolžin \times lomni količnik) med točkama A in B ima ekstrem (minimum ali maksimum).

Odbojni zakon po Fermatu

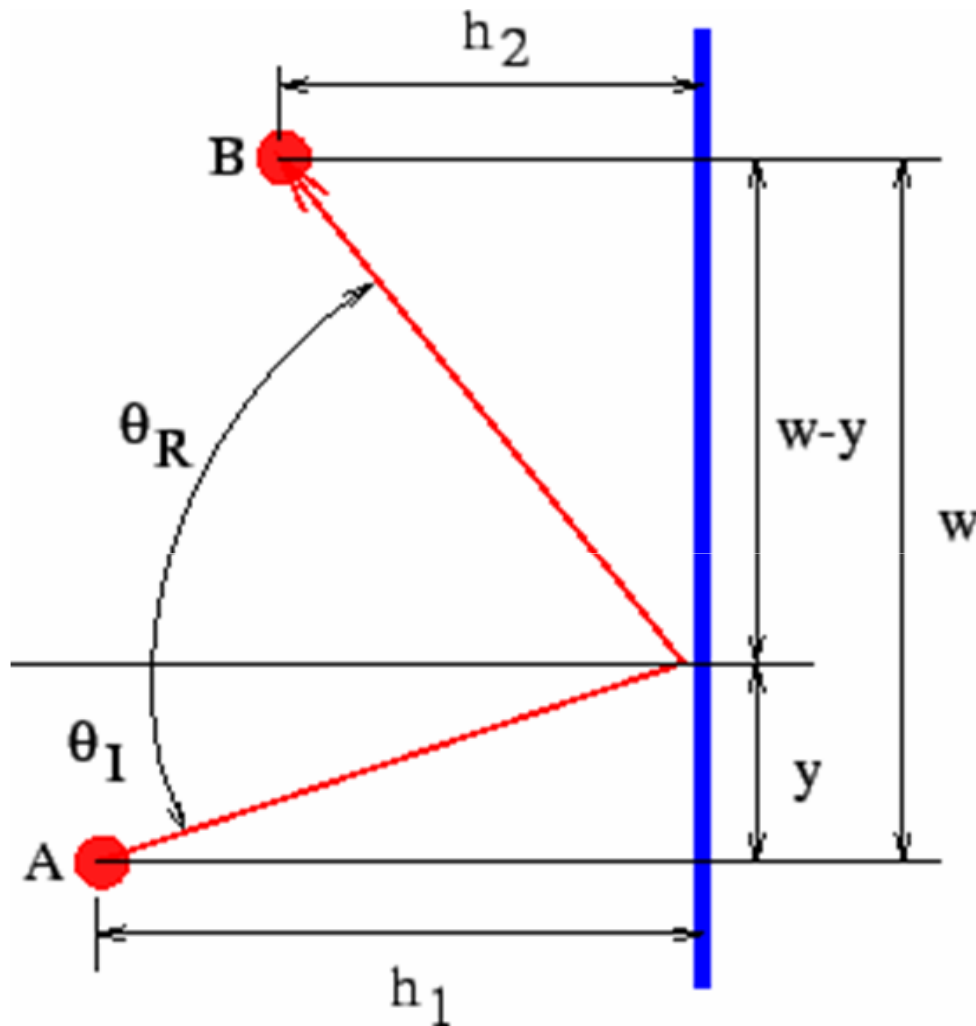


$$L = \sqrt{h^2 + x^2} + \sqrt{h^2 + (w - x)^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} L = \frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{1}{2} \frac{2(w - x)}{\sqrt{h^2 + (w - x)^2}} = 0$$

$$\sin(\theta_i) - \sin(\theta_r) = 0 \rightarrow \theta_i = \theta_r$$

Odbojni zakon po Fermatu



$$t = \frac{1}{c} (\sqrt{h_1^2 + y^2} + \sqrt{h_2^2 + (w-y)^2})$$
$$\frac{dt}{dy} = \frac{2y}{\sqrt{h_1^2 + y^2}} + \frac{-2(w-y)}{\sqrt{h_2^2 + (w-y)^2}} = 0$$

$$\frac{y}{\sqrt{h_1^2 + y^2}} = \frac{(w-y)}{\sqrt{h_2^2 + (w-y)^2}}$$

$$\sin \theta_I = \sin \theta_R$$

Odboj na gladki in hrapavi površini

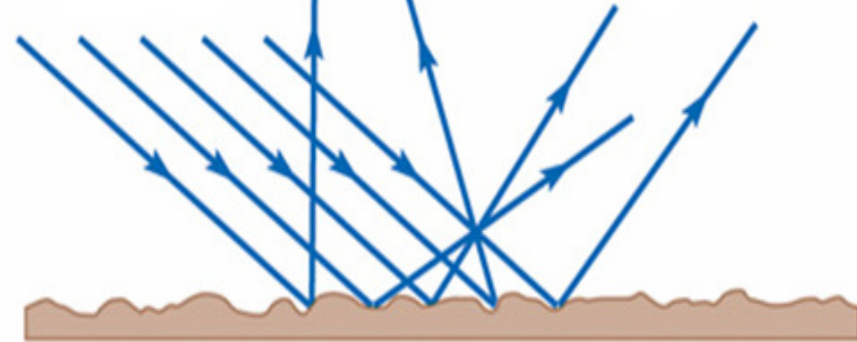
Zrcalni odboj



Gladka površina

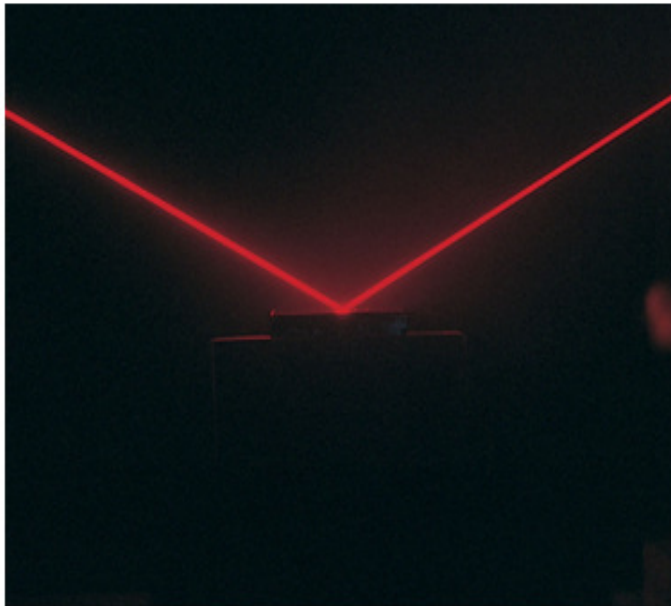
(a)

Difuzni odboj

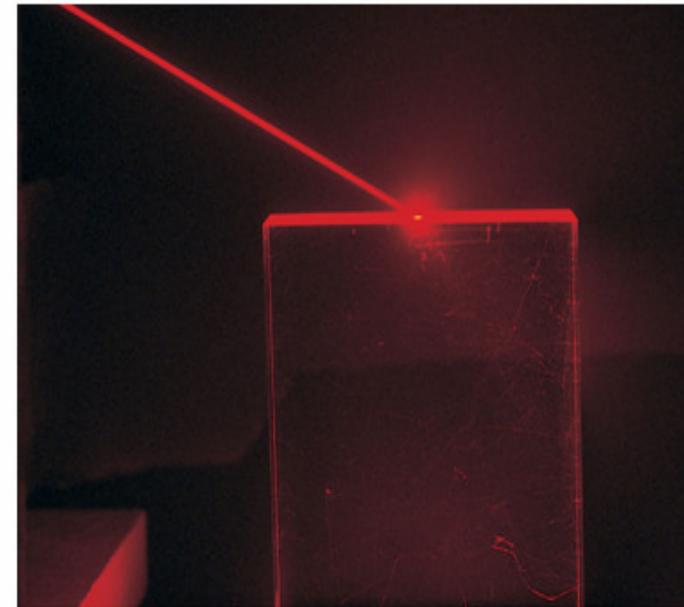


Hrapava površina

(b)



© 2004 Thomson - Brooks/Cole



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

Fresnelove formule za odboj in lom

$$\theta_r = \theta_i \quad \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2}} \quad \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \quad \eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \text{ Snov brez izgub}$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\hat{E}_{\parallel m}^r}{\hat{E}_{\parallel m}^i} = \frac{\cos \theta_t - \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1} \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1} \cos \theta_t}$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\hat{E}_{\perp m}^r}{\hat{E}_{\perp m}^i} = \left(\frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1} \cos \theta_t}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1} \cos \theta_t} \right)$$

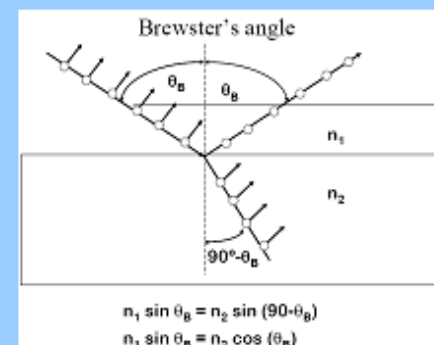
$$T_{\parallel} = \frac{\hat{E}_{\parallel m}^t}{\hat{E}_{\parallel m}^i} = \frac{2\eta_2 \cdot \cos \theta_i}{\eta_1 \cdot \cos \theta_i + \eta_2 \cdot \cos \theta_t}$$

$$T_{\perp} = \frac{\hat{E}_{\perp m}^t}{\hat{E}_{\perp m}^i} = \left(\frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \right)$$

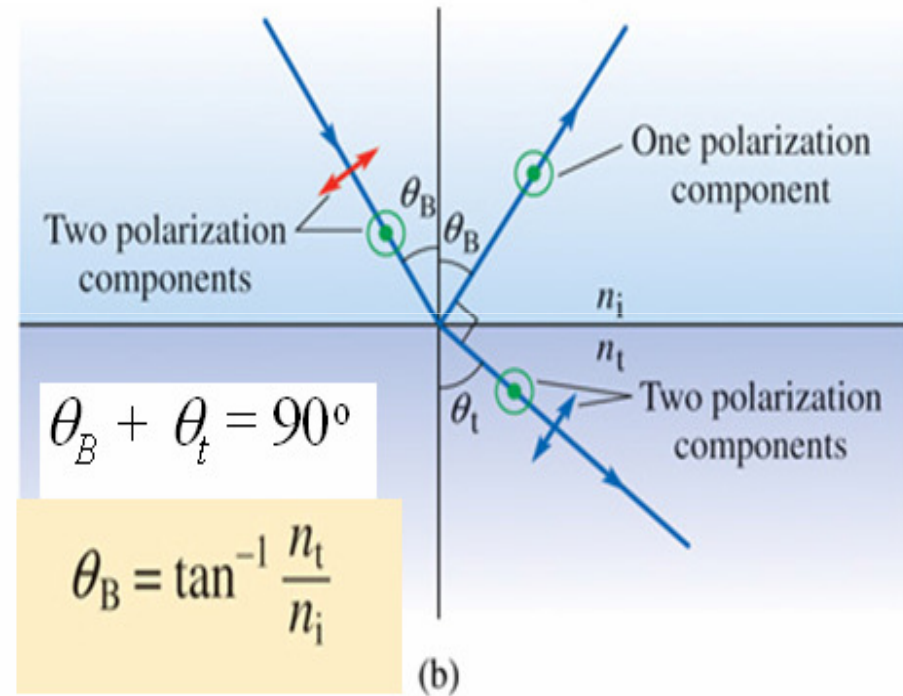
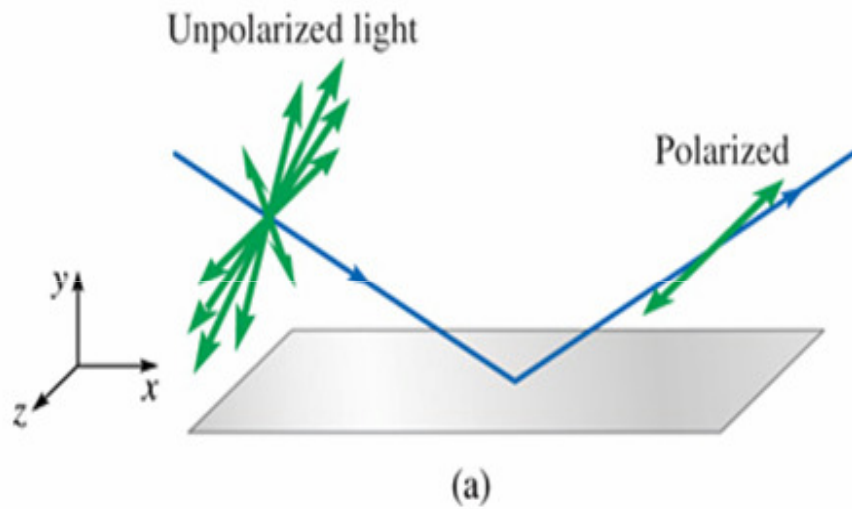
$$\theta_{iB} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad \theta_{critical} = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$$

$$\hat{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{E}}_m \cdot e^{-j\beta \cdot \mathbf{r}}$$

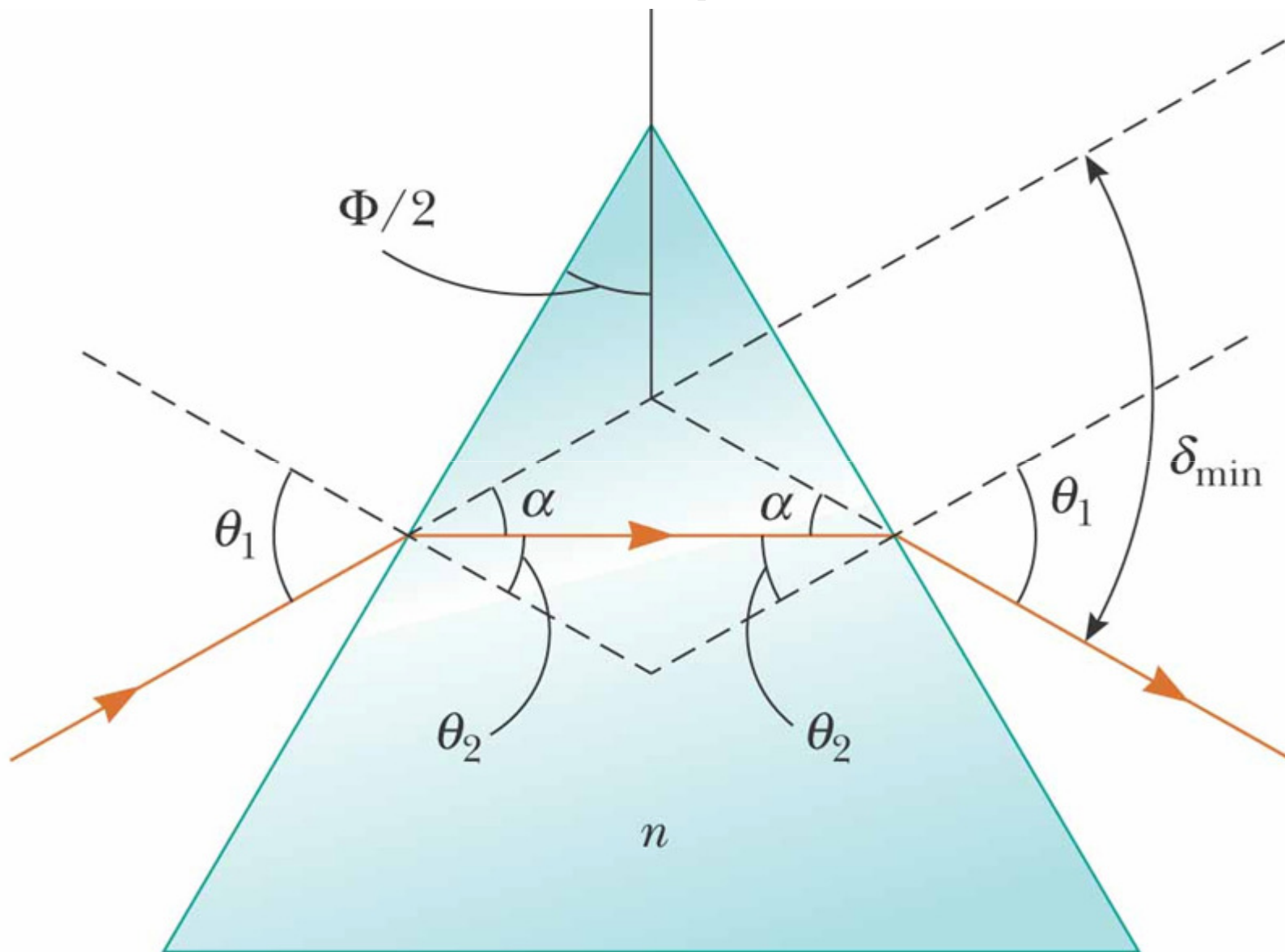
$$\hat{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{n}_{\beta} \times \hat{\mathbf{E}}(r)}{\eta} = \frac{\mathbf{n}_{\beta} \times \hat{\mathbf{E}}_m \cdot e^{-j\beta \cdot \mathbf{r}}}{\eta}$$



Brewstrov kot za vertikalno polarizacijo

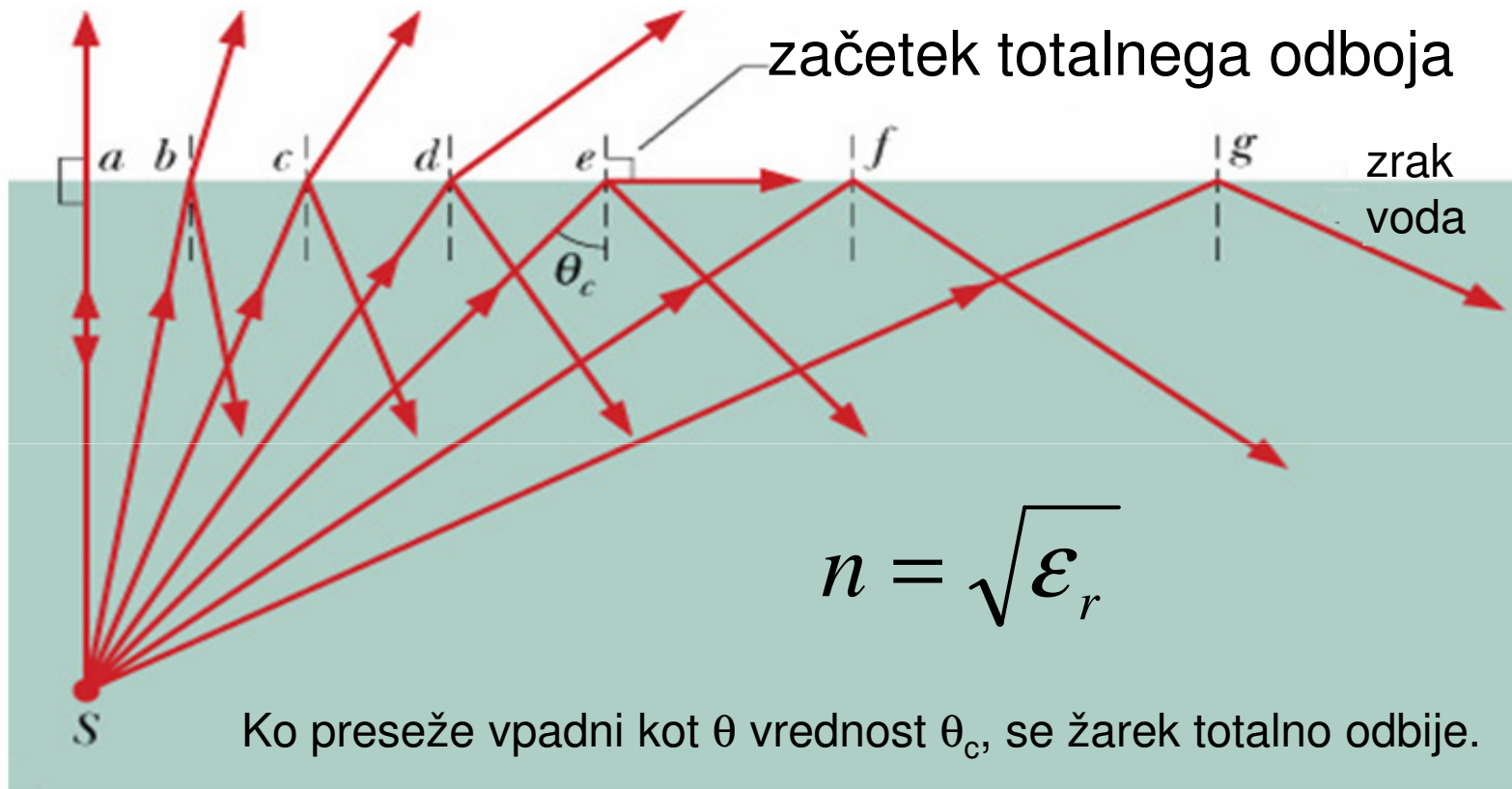


Lom na prizmi



Popolni notranji odboj

Lom + odboj in totalni odboj

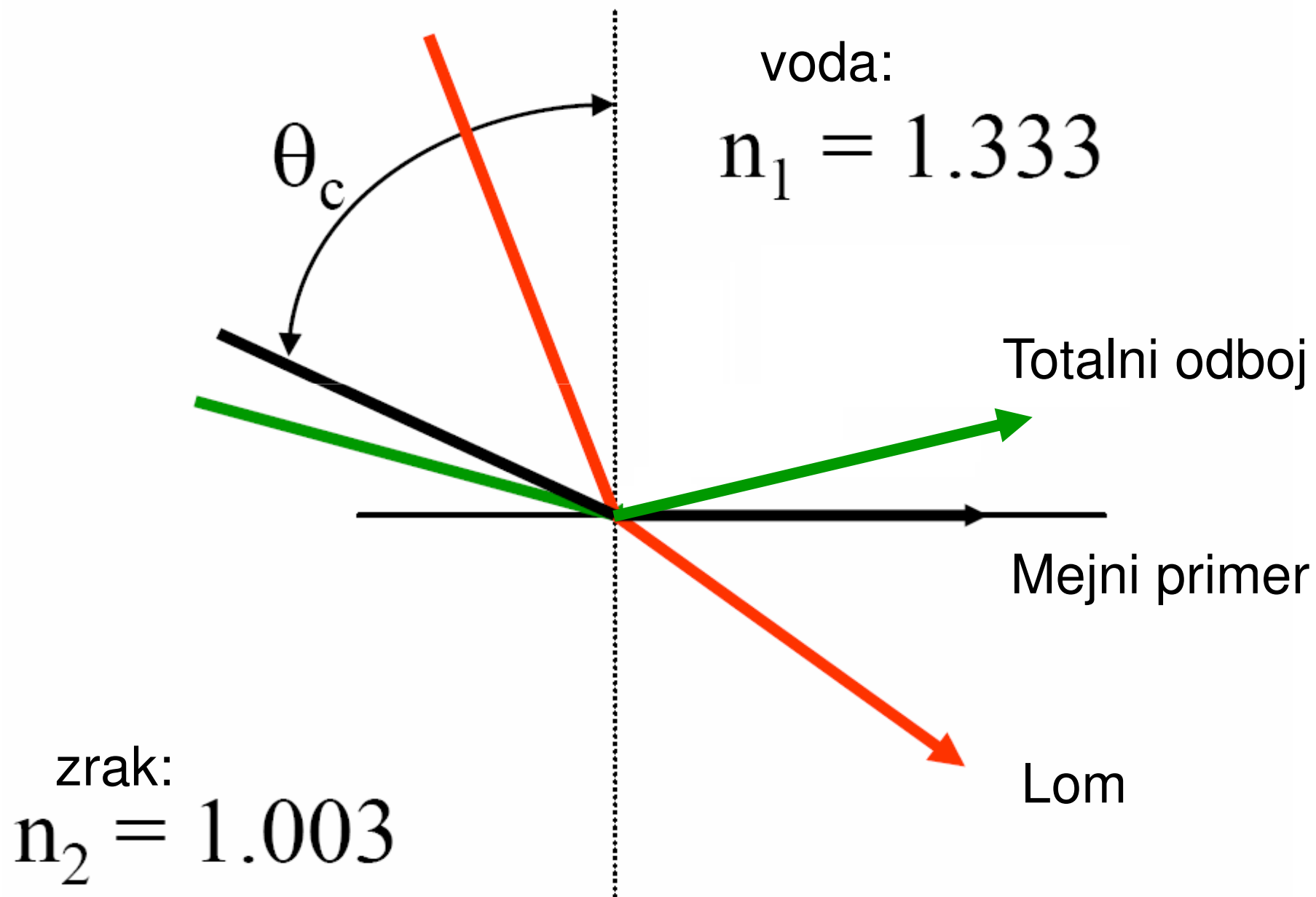


$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

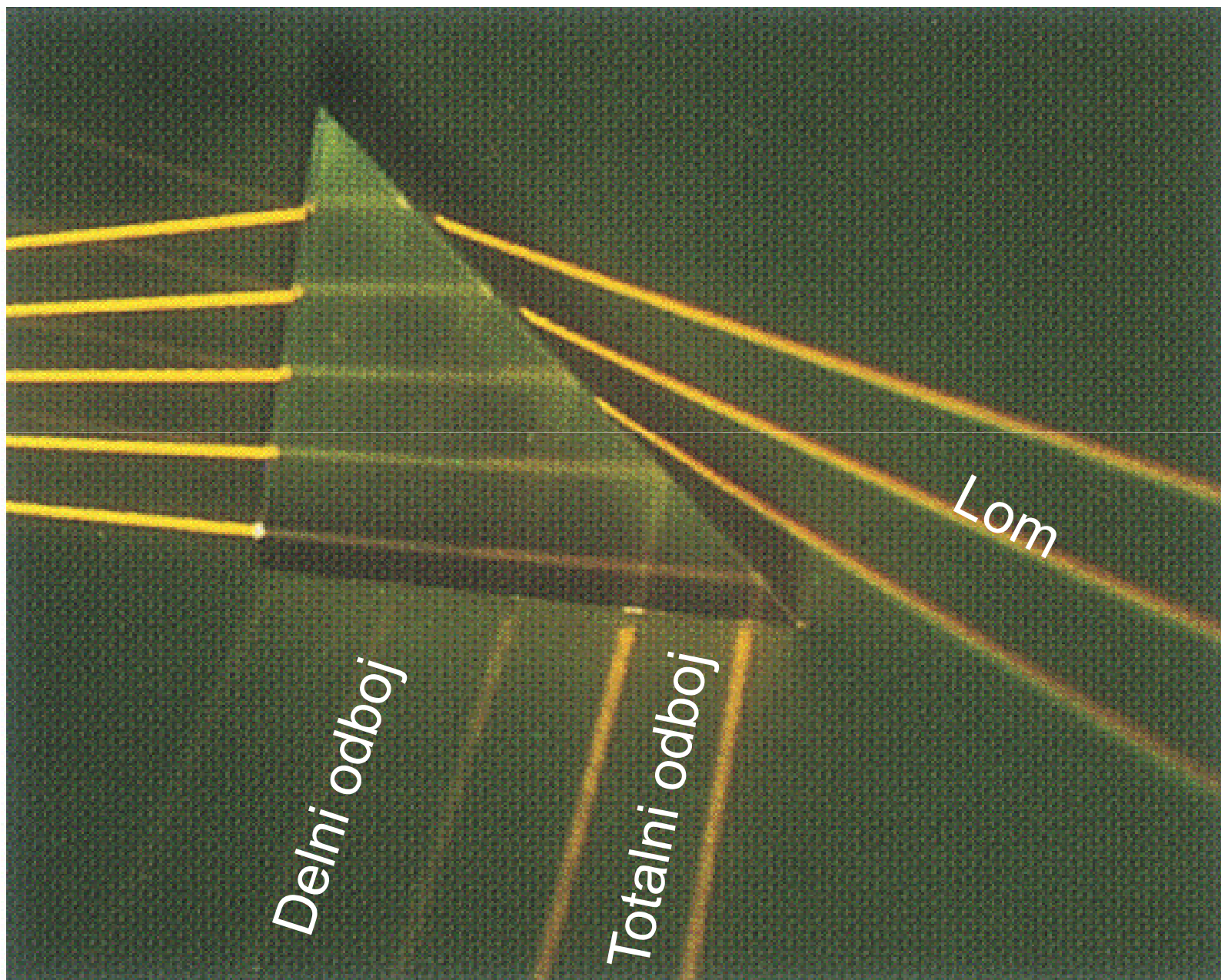
(1.33) *Pri* $\sin \theta_1 = (1.00) \sin 90 = 1.00$ *totalni odboj*

$$\theta_1 \geq \sin^{-1} \frac{1}{1.33} \geq 48.75$$

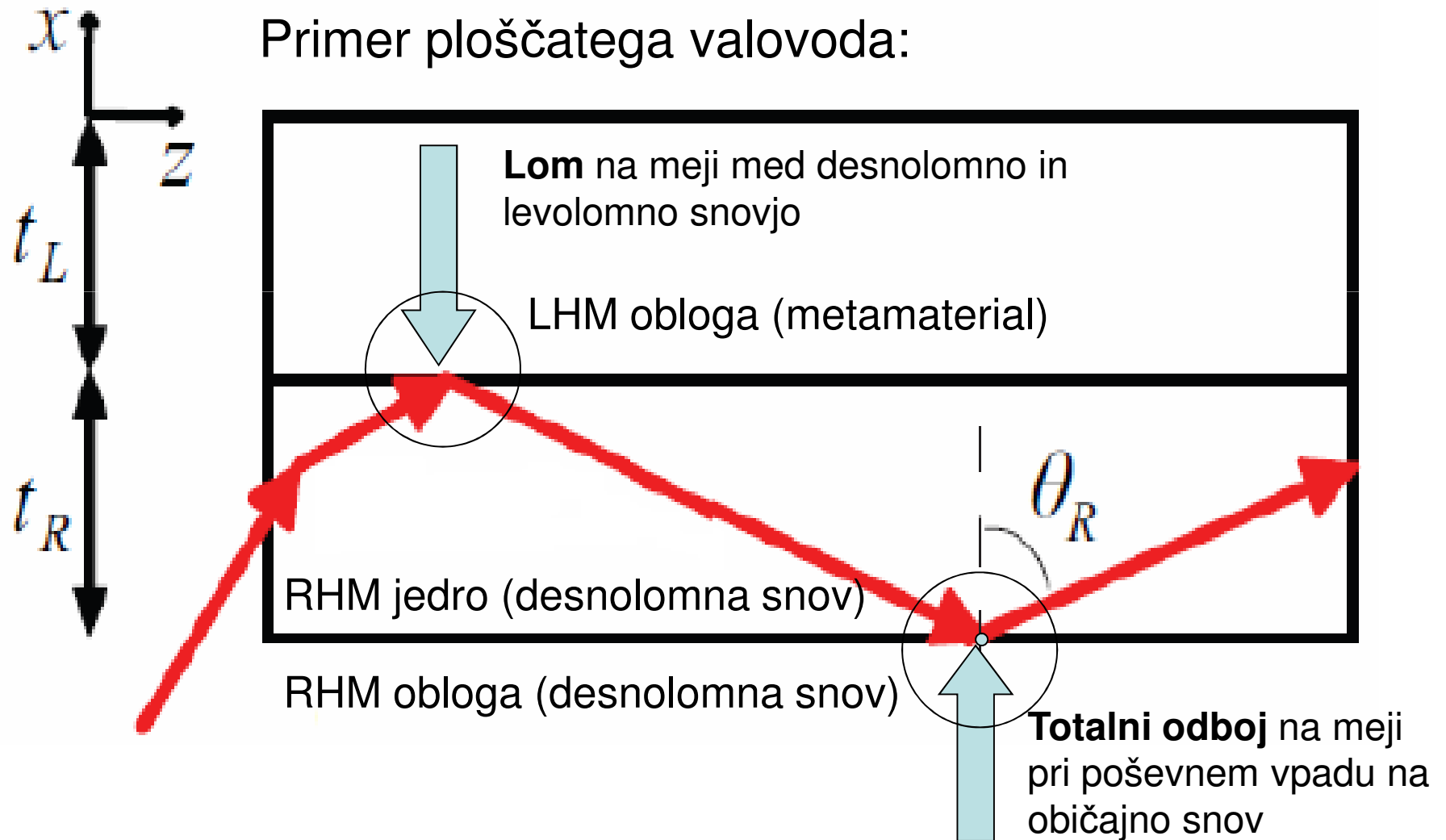
Prehod voda - zrak



Lom in totalni odboj



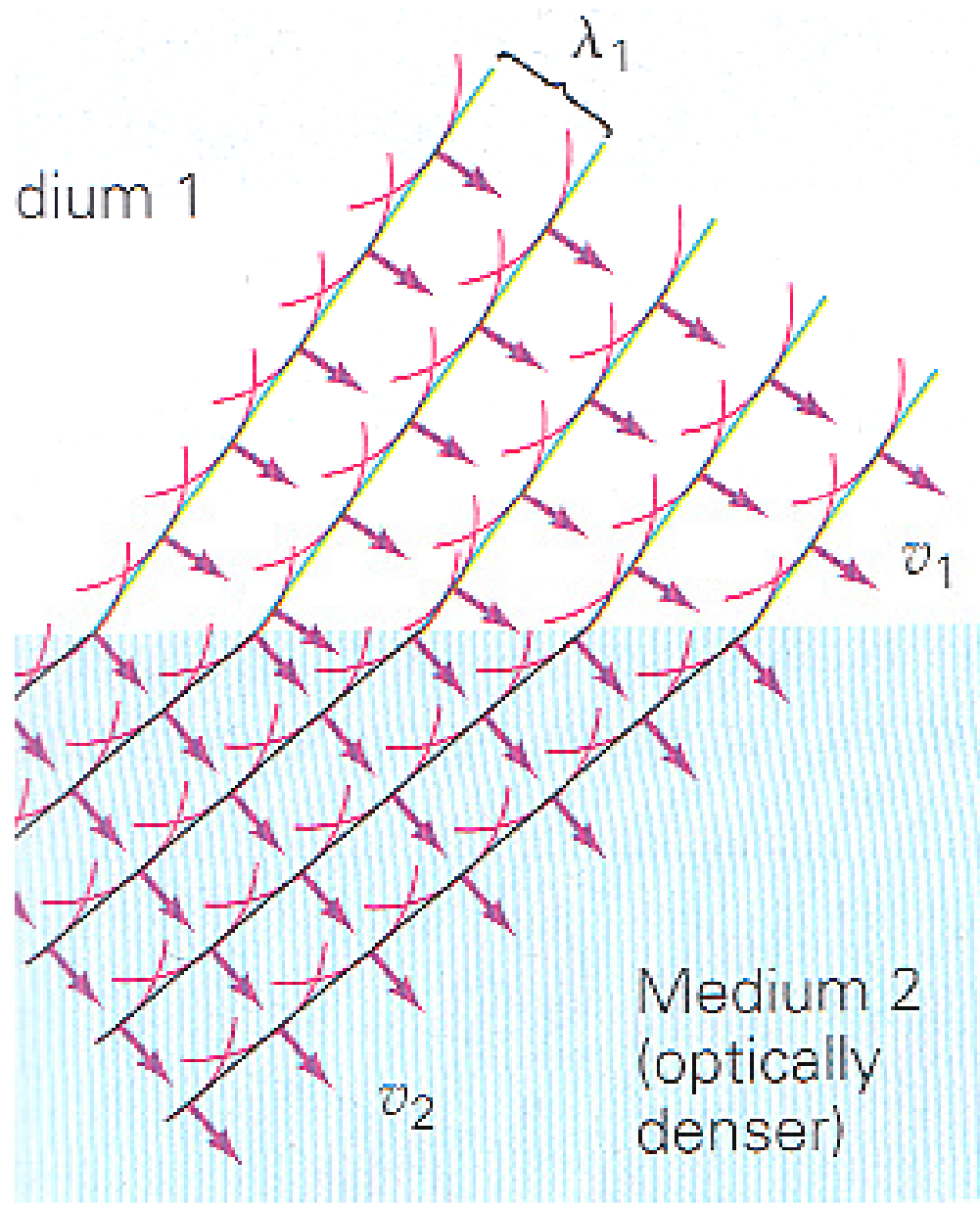
Optični valovod z oblogo iz metamateriala



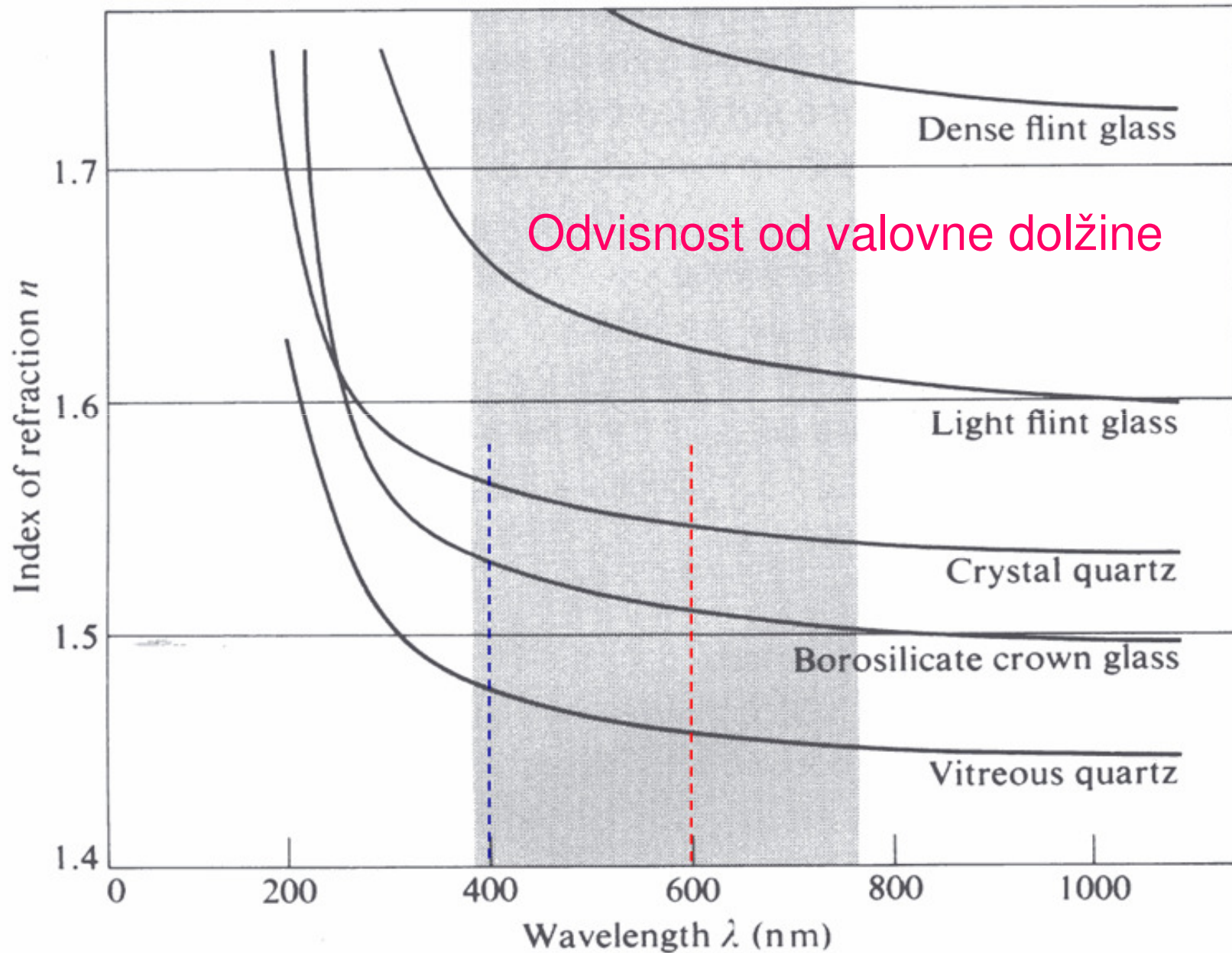
Barvni razklon

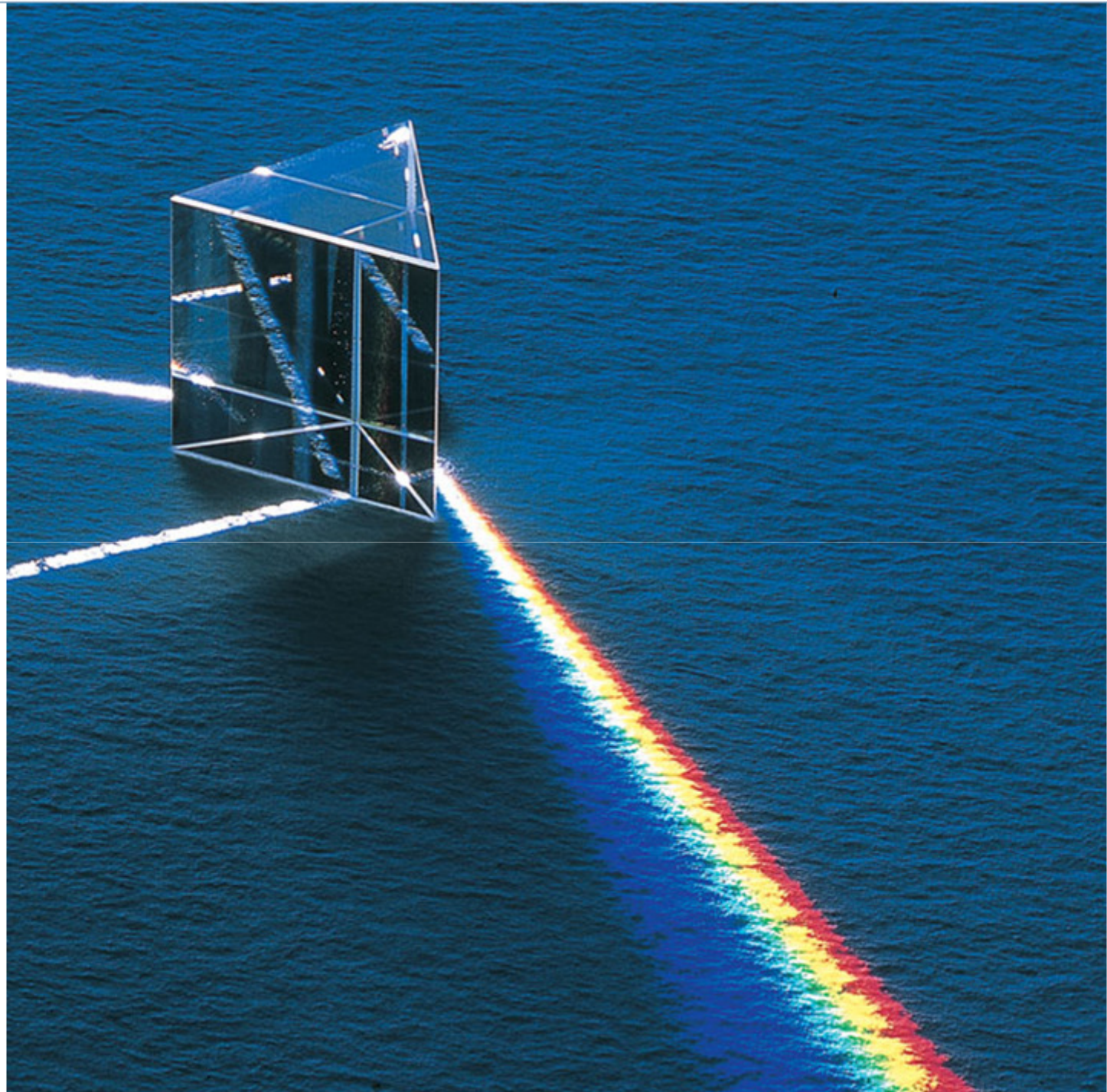
Disperzija

(Razpršitev skupinske hitrosti)

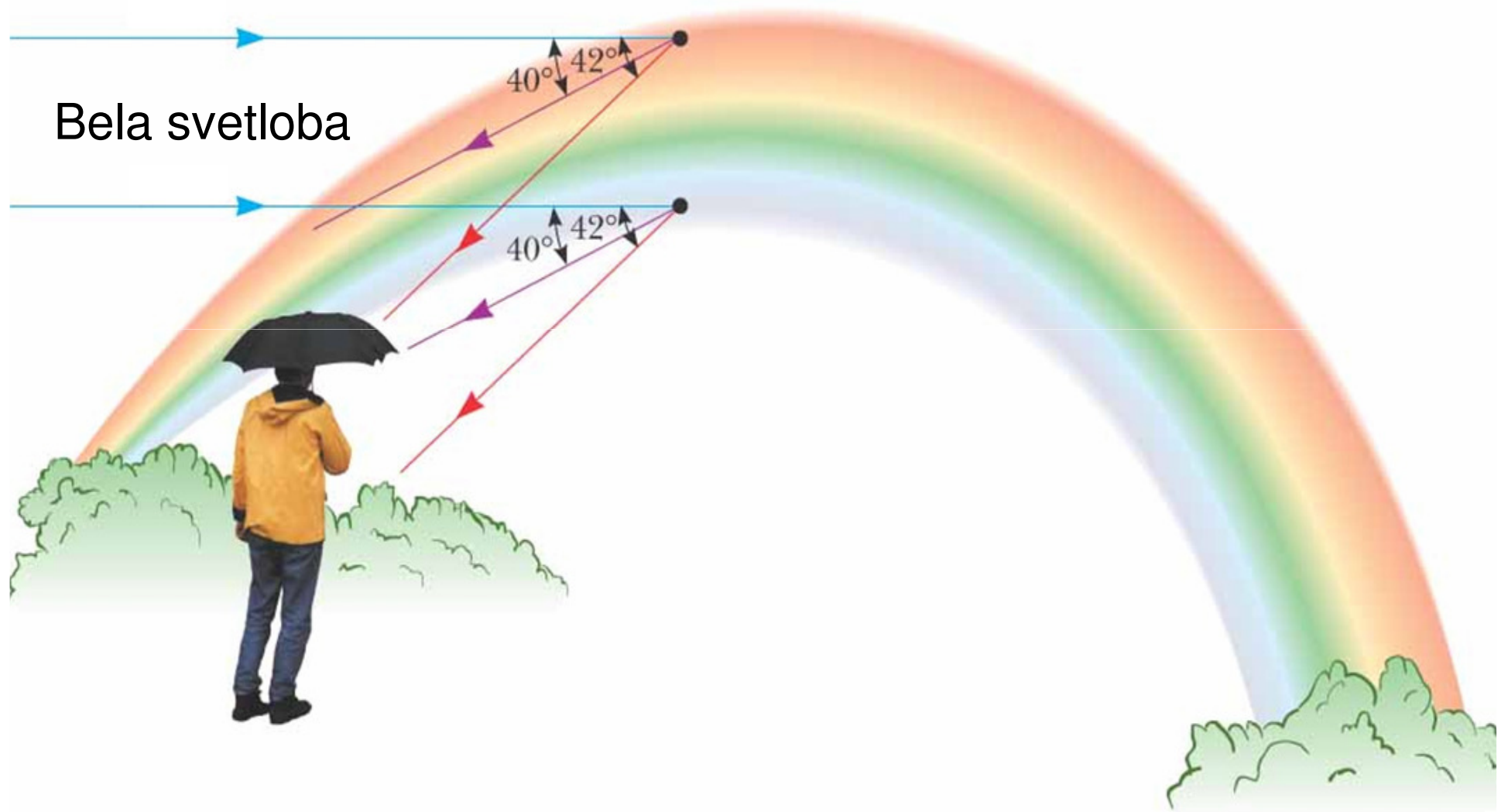


Lomni količnik nekaterih stekel

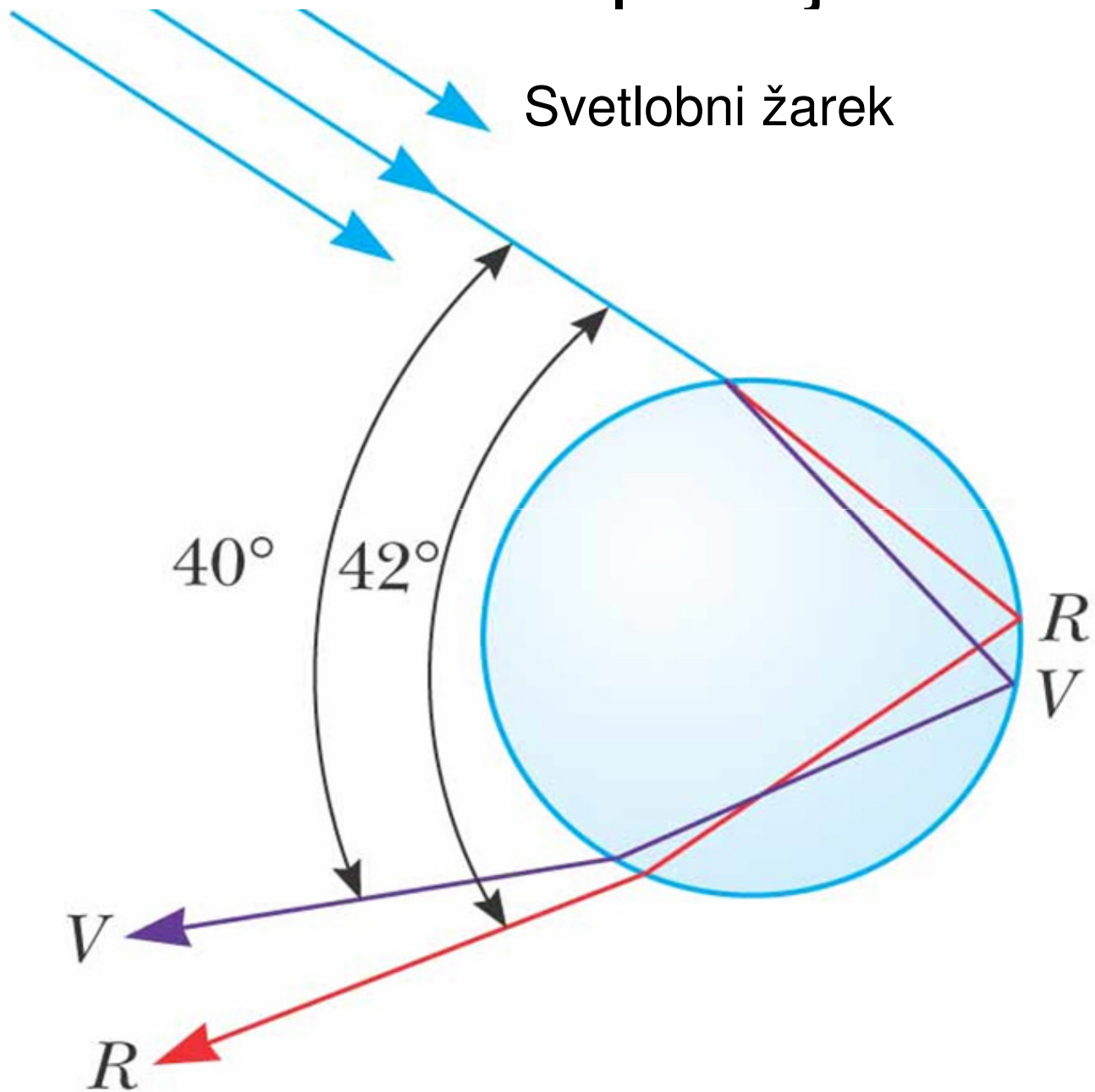




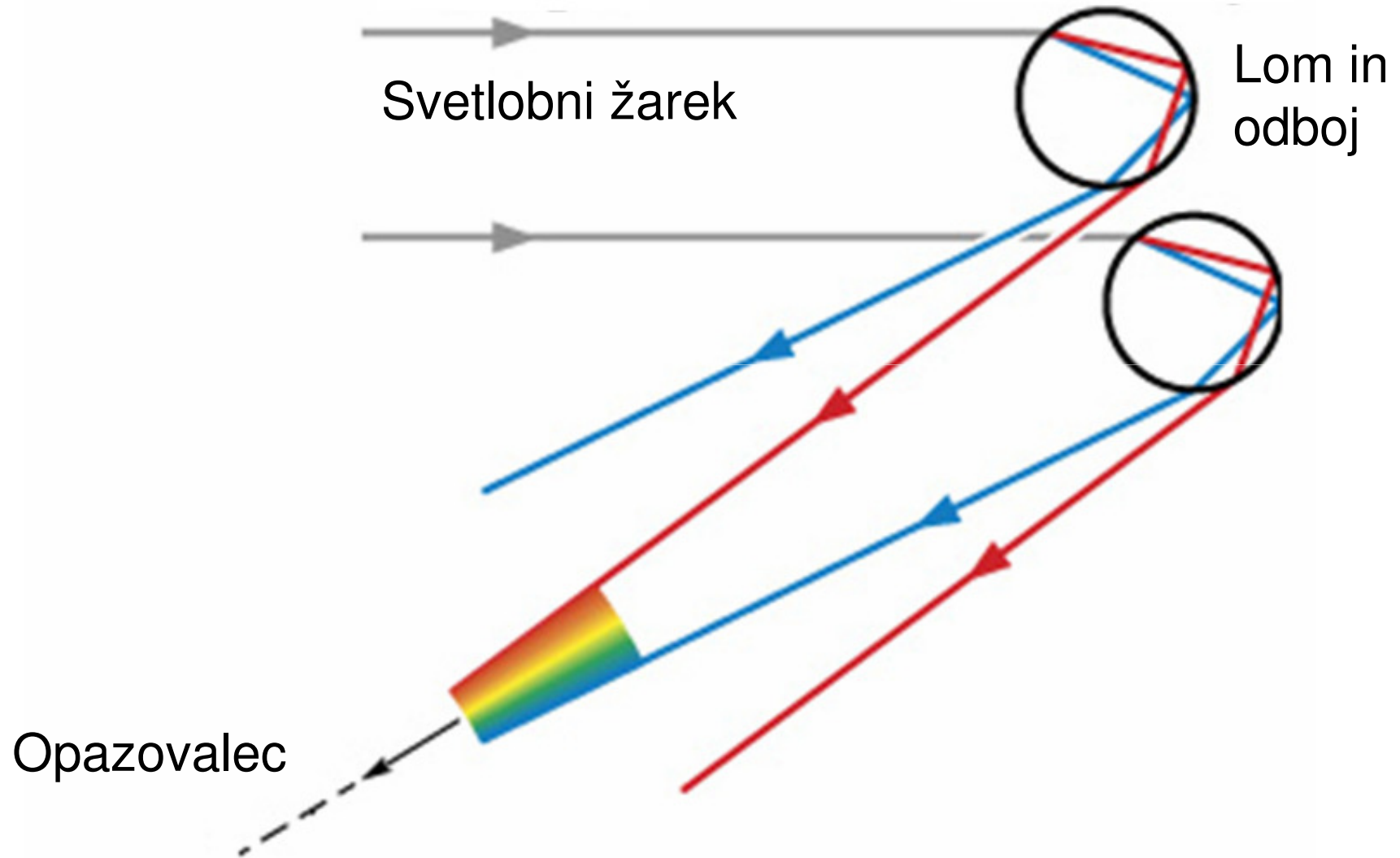
Mavrica



Barvna disperzija

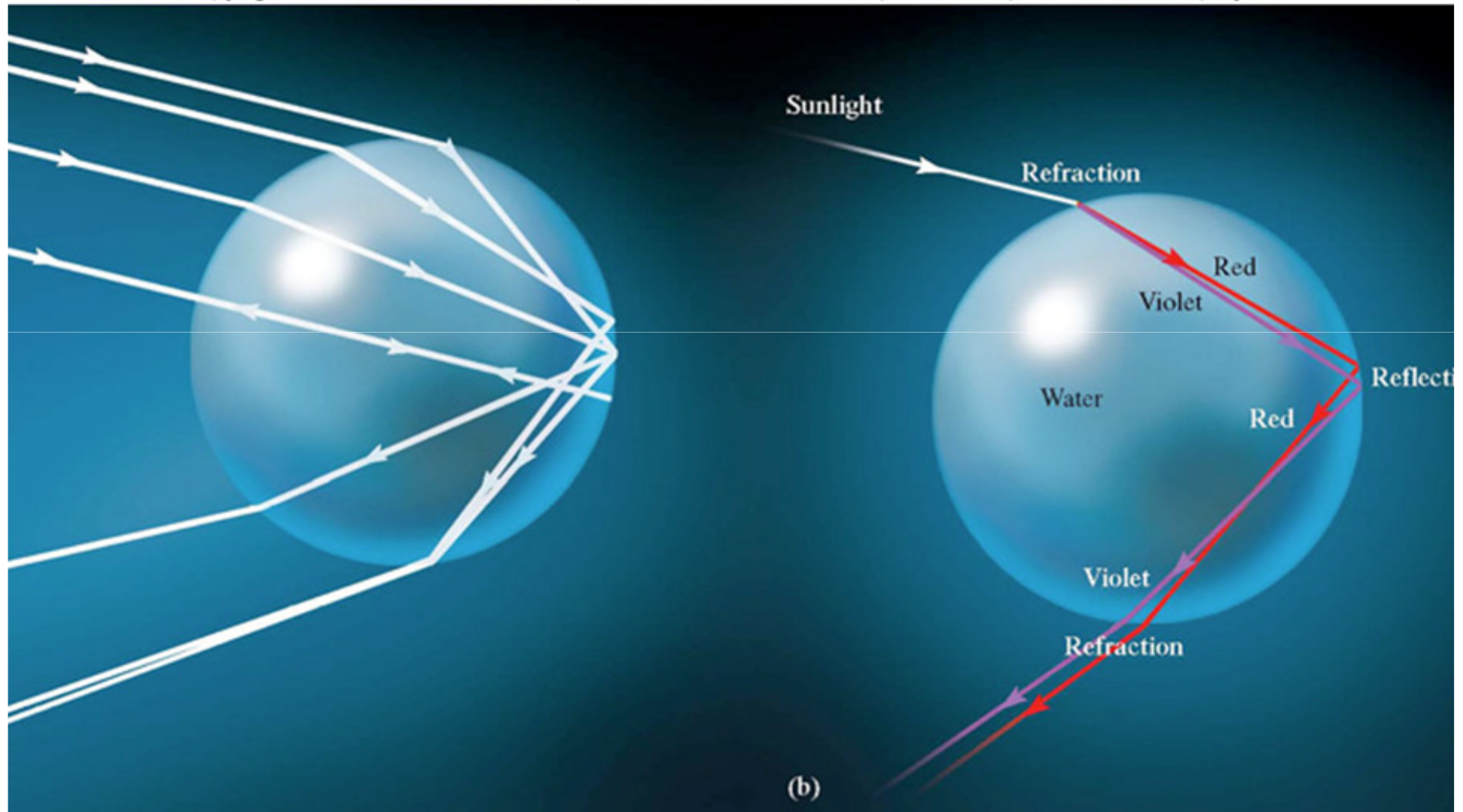


Lom svetlobe na disperznih kapljicah



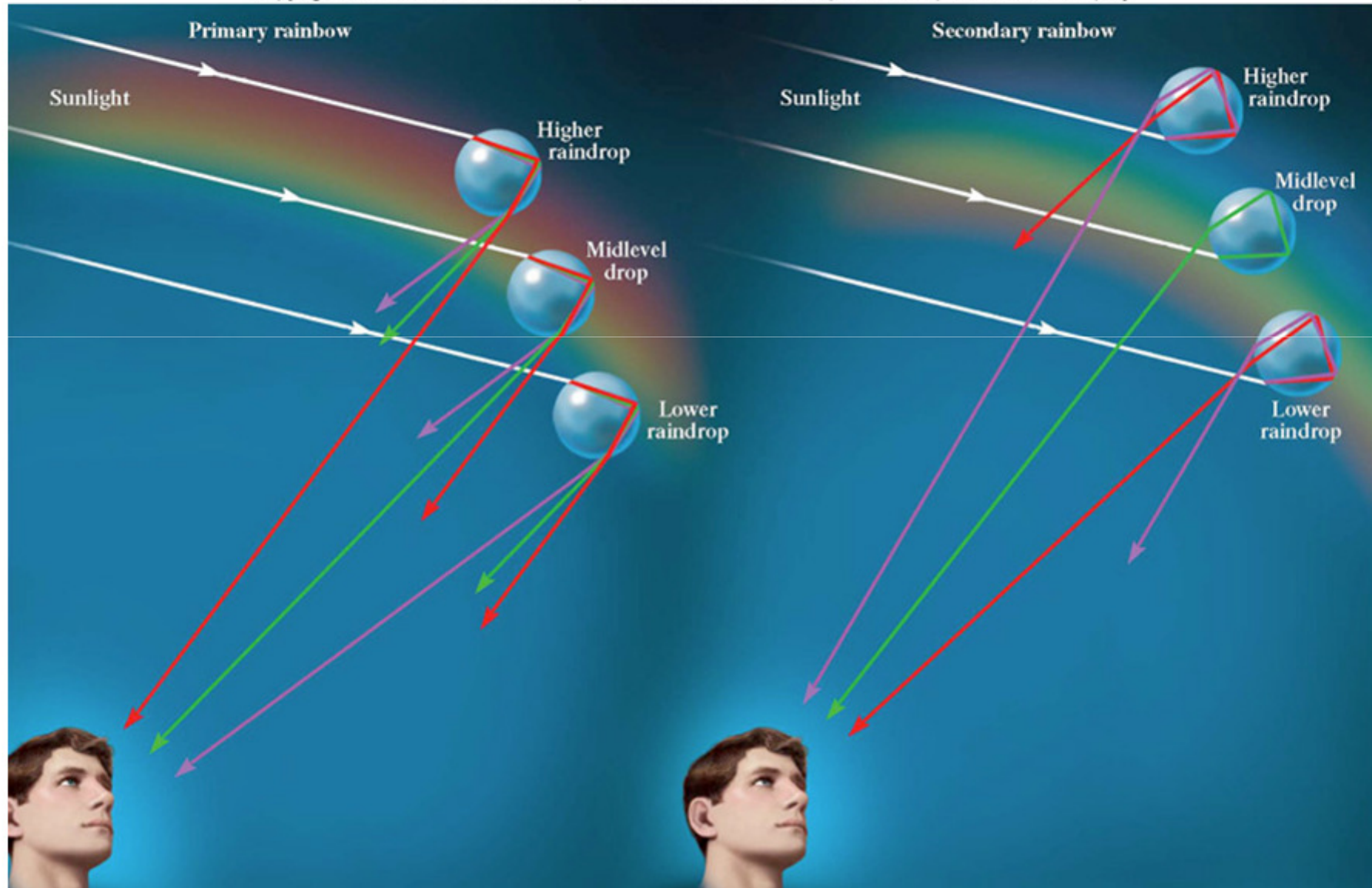
Total Internal Reflection

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Total Internal Reflection

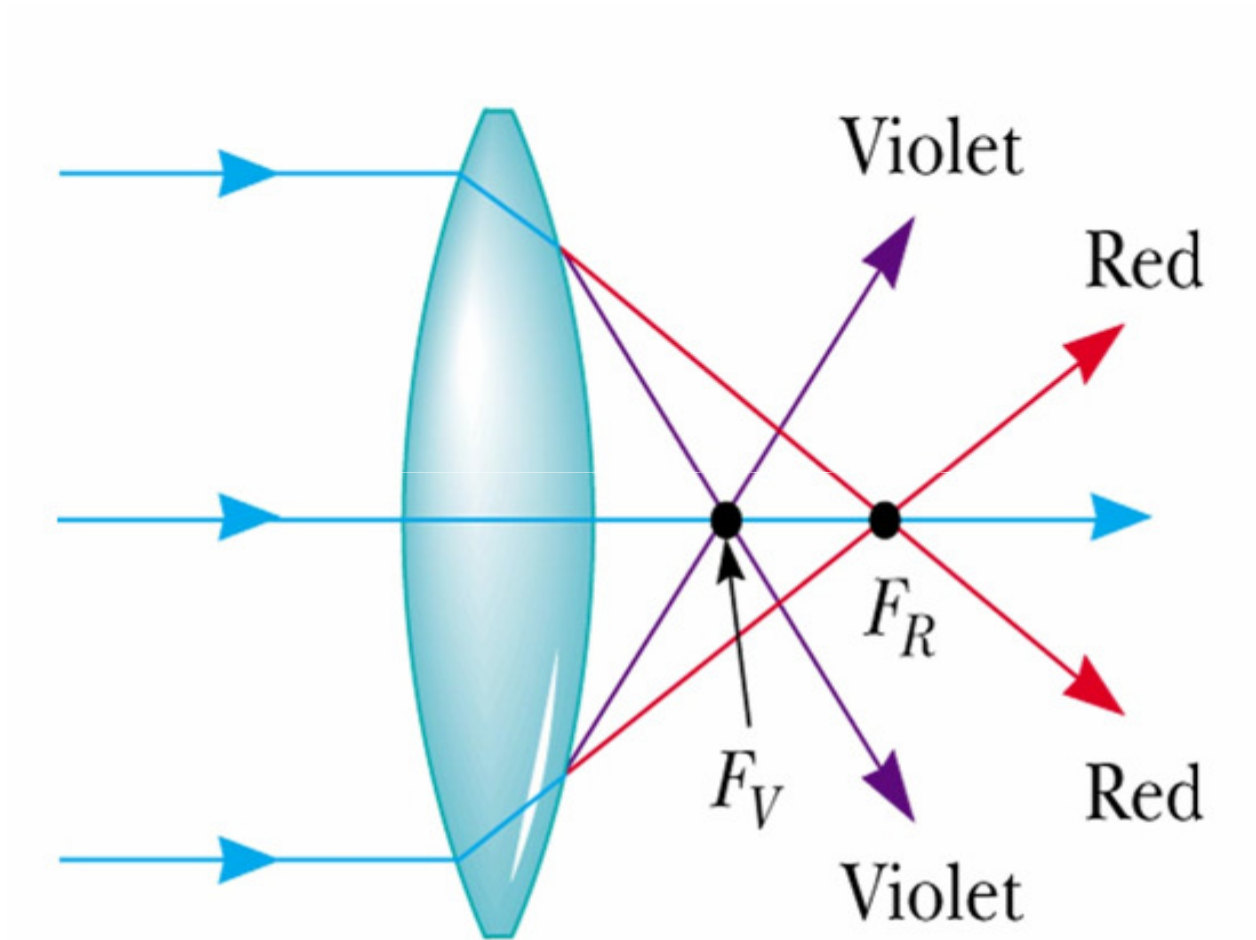
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Primarna in sekundarna mavrica

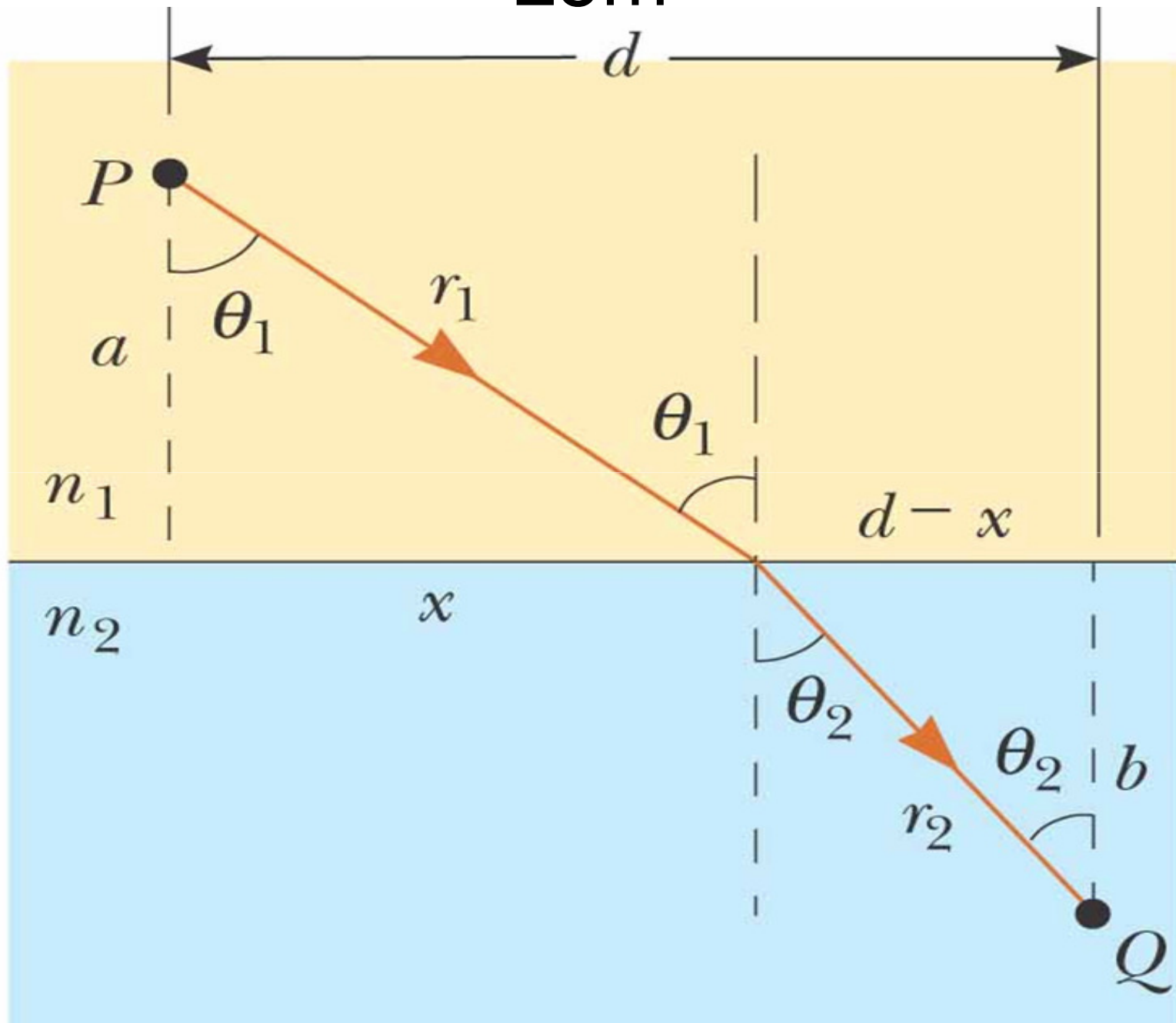


Kromatska aberacija leče



Lom

Lom



Physics at Home

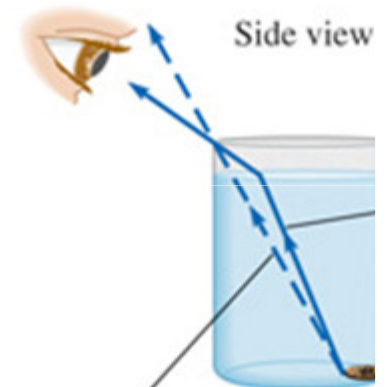
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



(a)



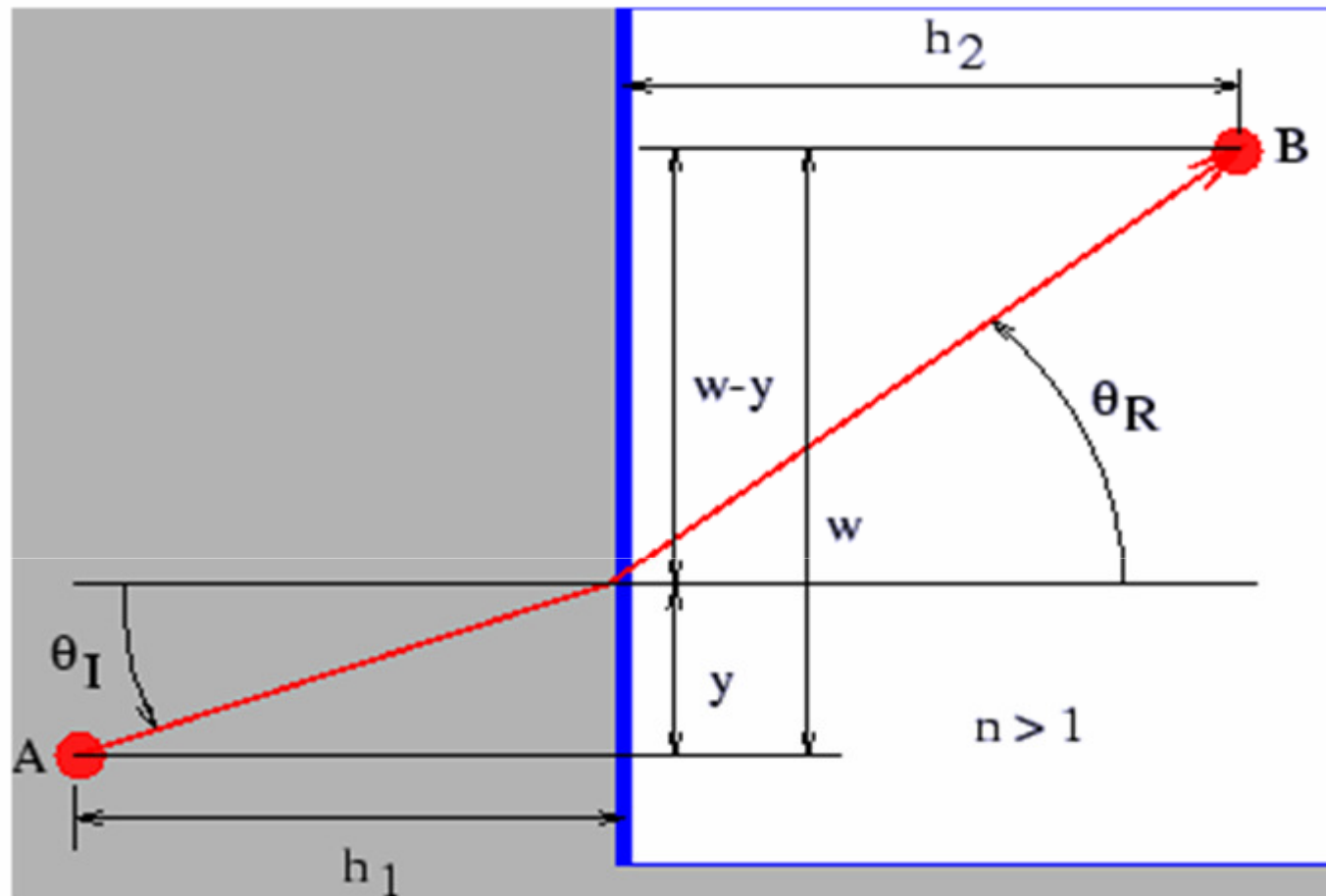
(b)



When mug is empty, ray from edge of coin does not enter the eye.

(c)

Lomni zakon po Fermatu

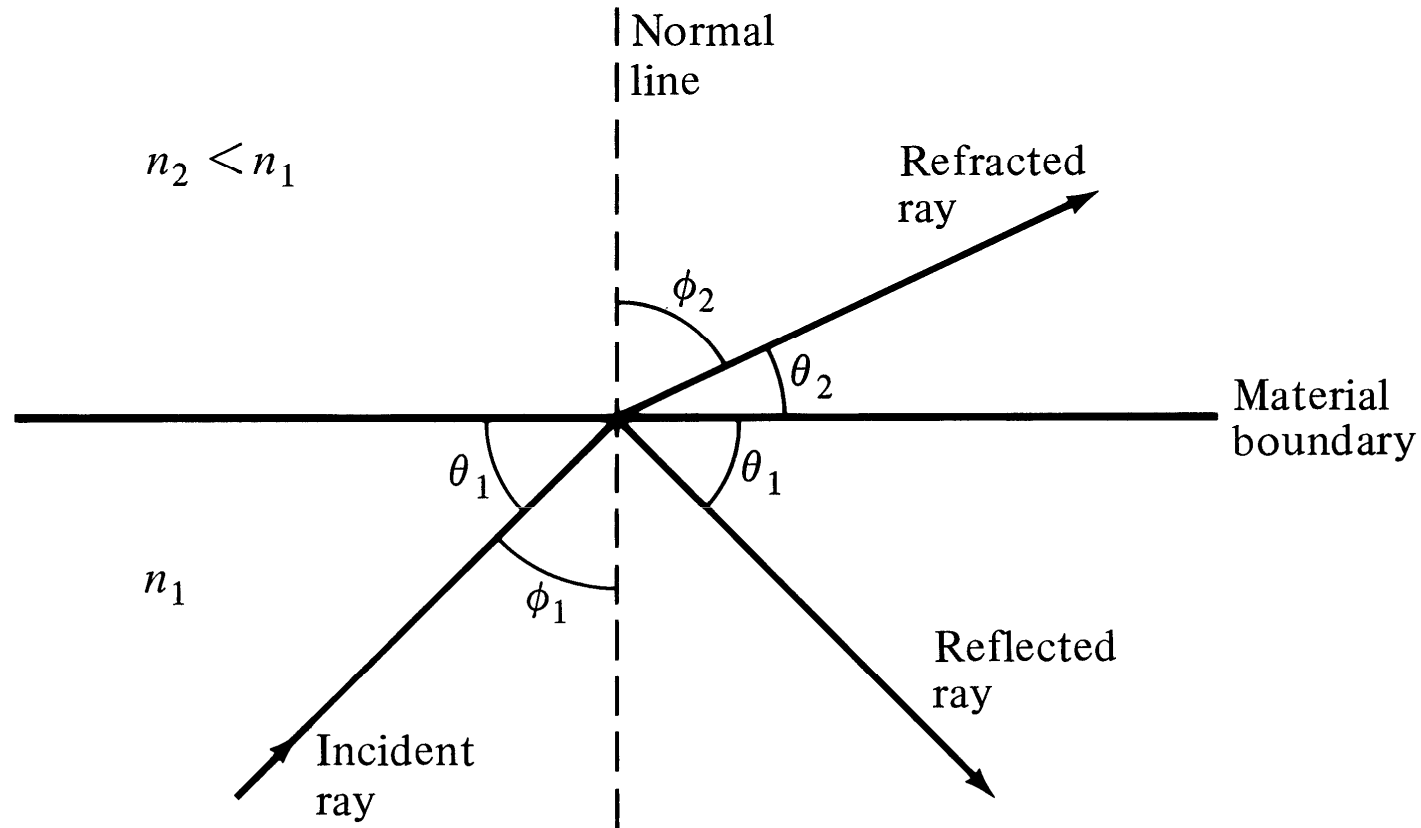


$$t = \left(\frac{1}{v_1} \sqrt{h_1^2 + y^2} + \frac{1}{v_2} \sqrt{h_2^2 + (w - y)^2} \right)$$

$$\frac{dt}{dy} = 0 \quad \frac{1}{v_1} \sin \theta_I = \frac{1}{v_2} \sin \theta_R$$

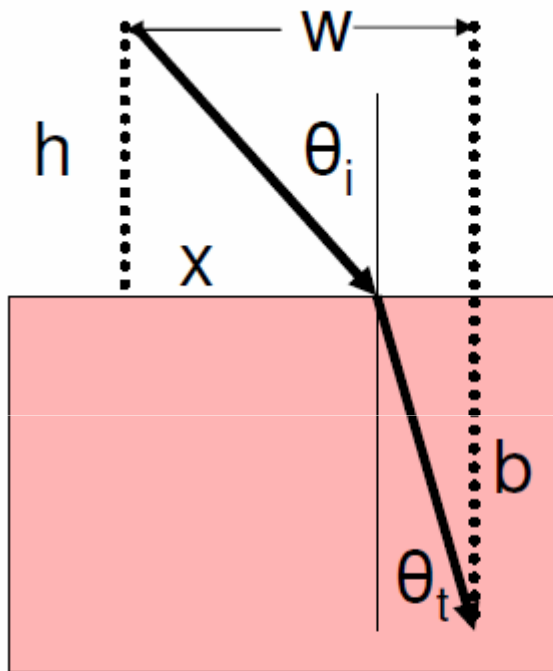
$$n_1 \sin \theta_I = n_2 \sin \theta_R$$

Lomni zakon na meji dveh dielektrikov



$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

Lomni zakon po Fermatu



$$n = \frac{c}{v} \rightarrow v_i = \frac{c}{n_i}$$

$$t = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_i} + \frac{\sqrt{b^2 + (w-x)^2}}{v_t}$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{2v_i} \frac{2x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{1}{2v_t} \frac{2(w-x)}{\sqrt{b^2 + (w-x)^2}} = 0$$

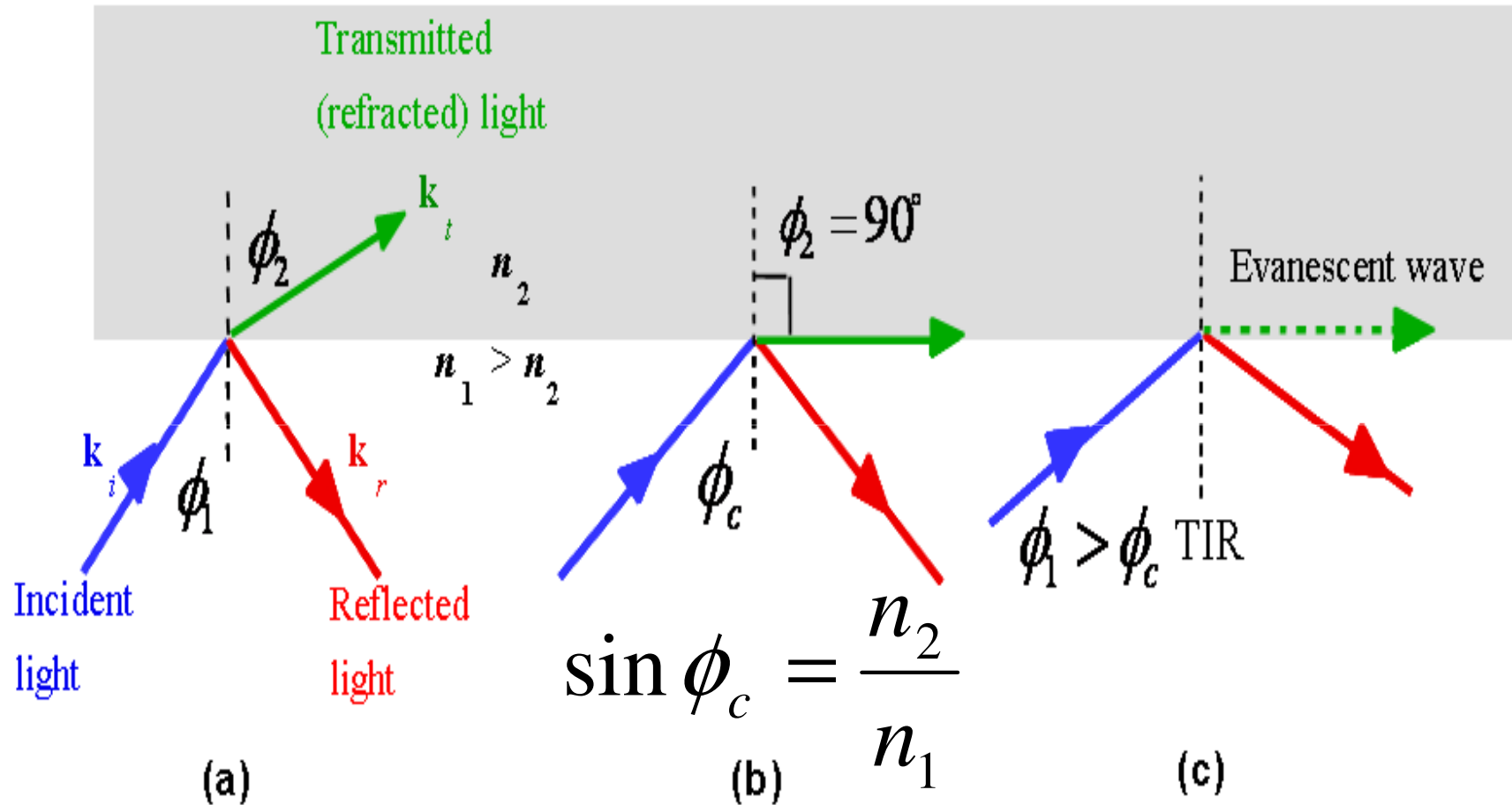
$$\frac{\sin(\theta_i)}{v_i} - \frac{\sin(\theta_t)}{v_t} = 0 \rightarrow n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t)$$

Snellov lomni zakon

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

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

Lom in totalni odboj

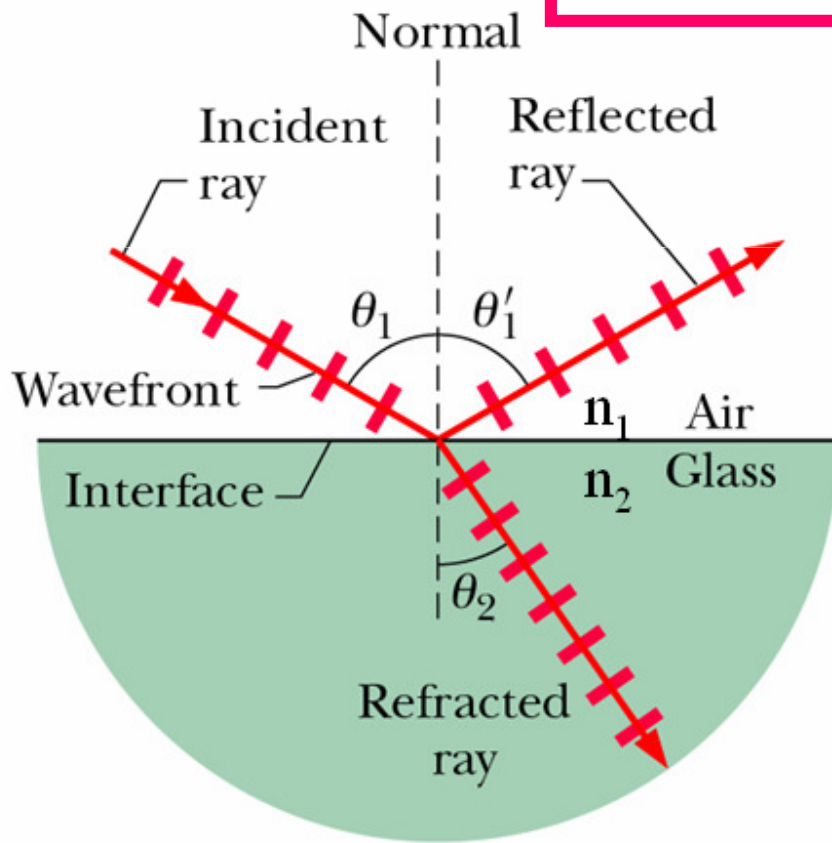


(a) Lomljena svetloba je val realne (delovne) moči

(b) Evanescentna svetloba je val imaginarne (jalove) moči, ki v zgornji snovi zelo hitro pojema.

Snellov lomni zakon

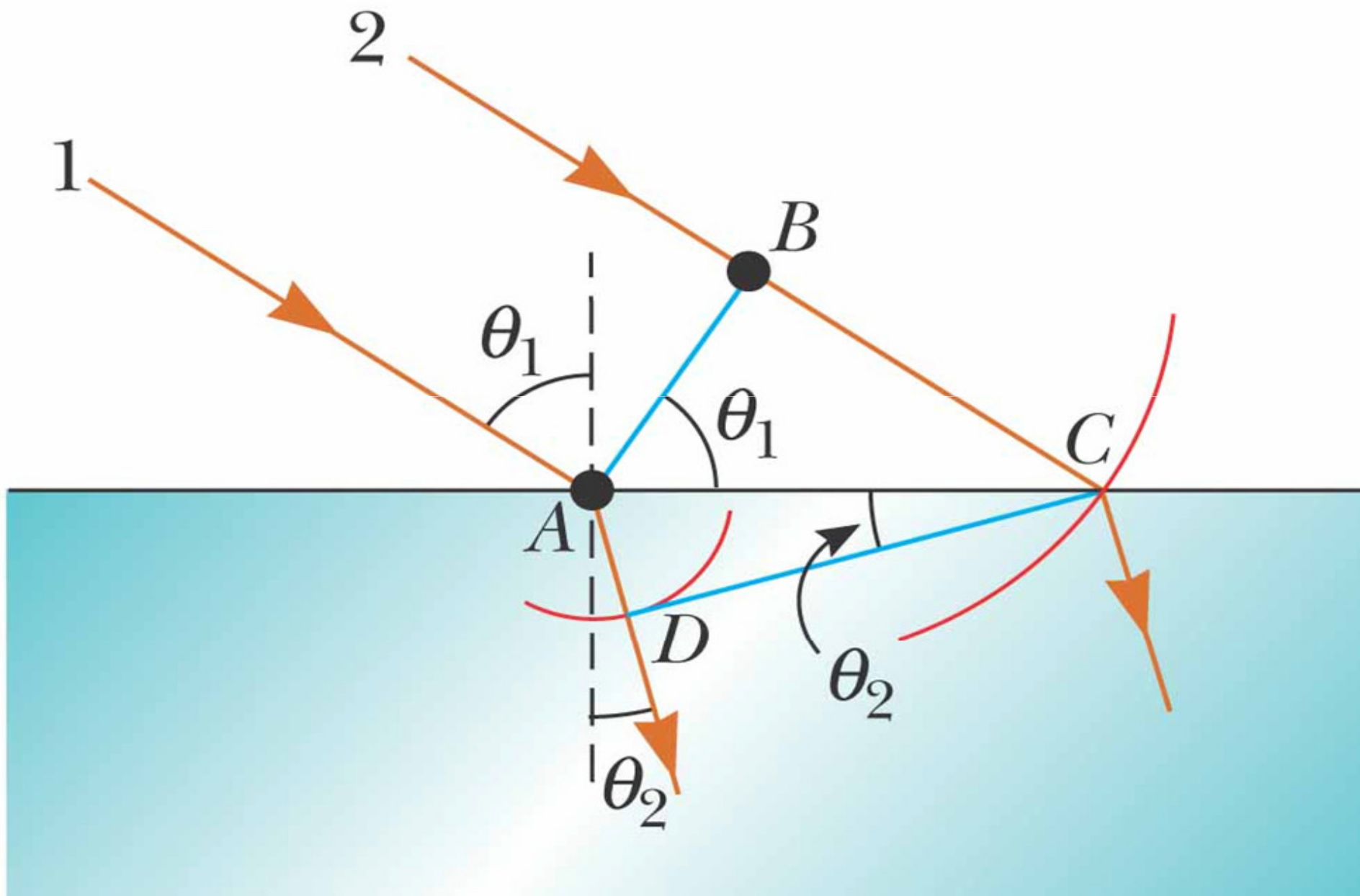
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



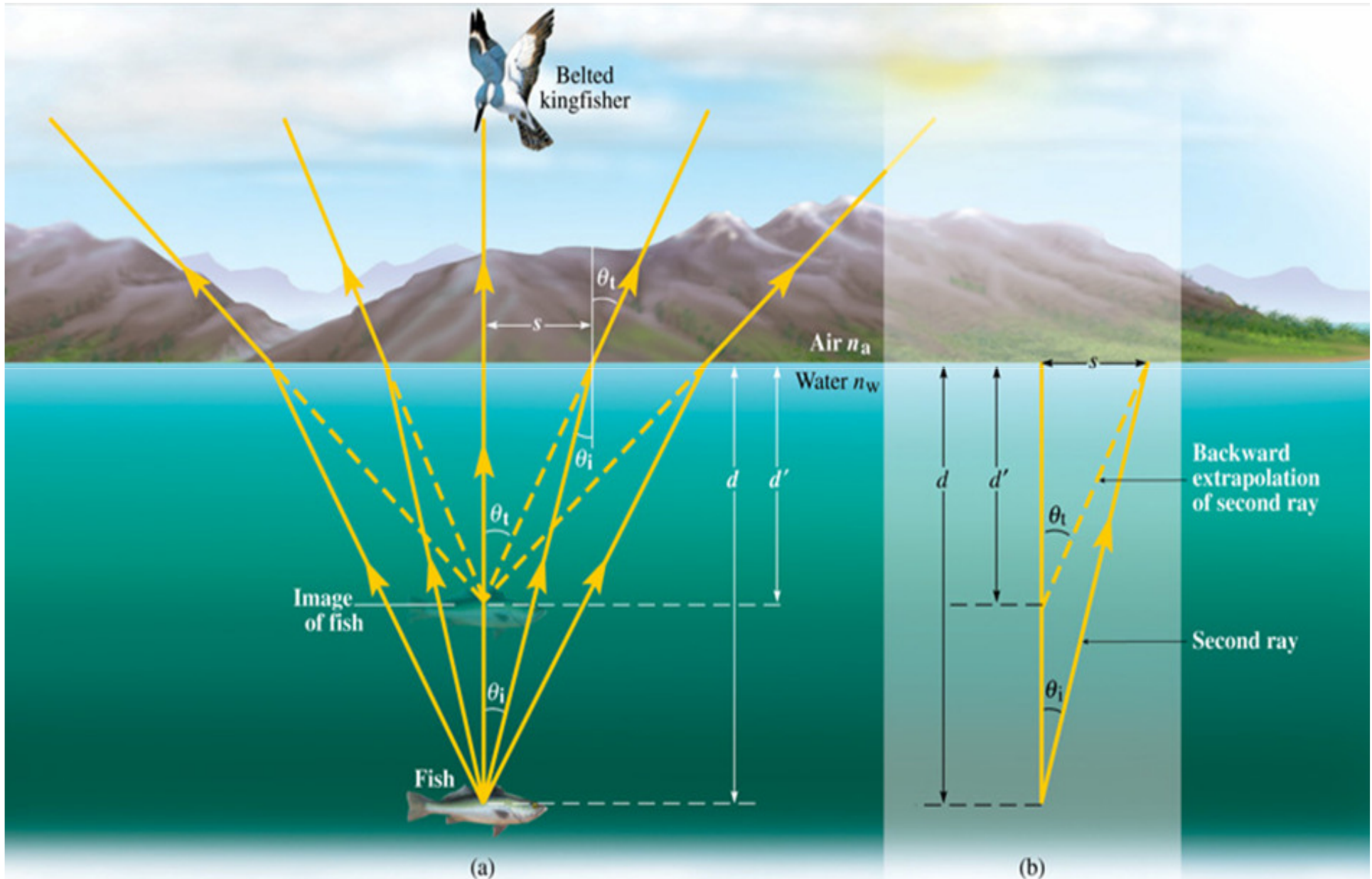
$$\frac{1}{v_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{v_2} \sin \theta_2$$

$n = 1.0$ zrak
 1.33 voda

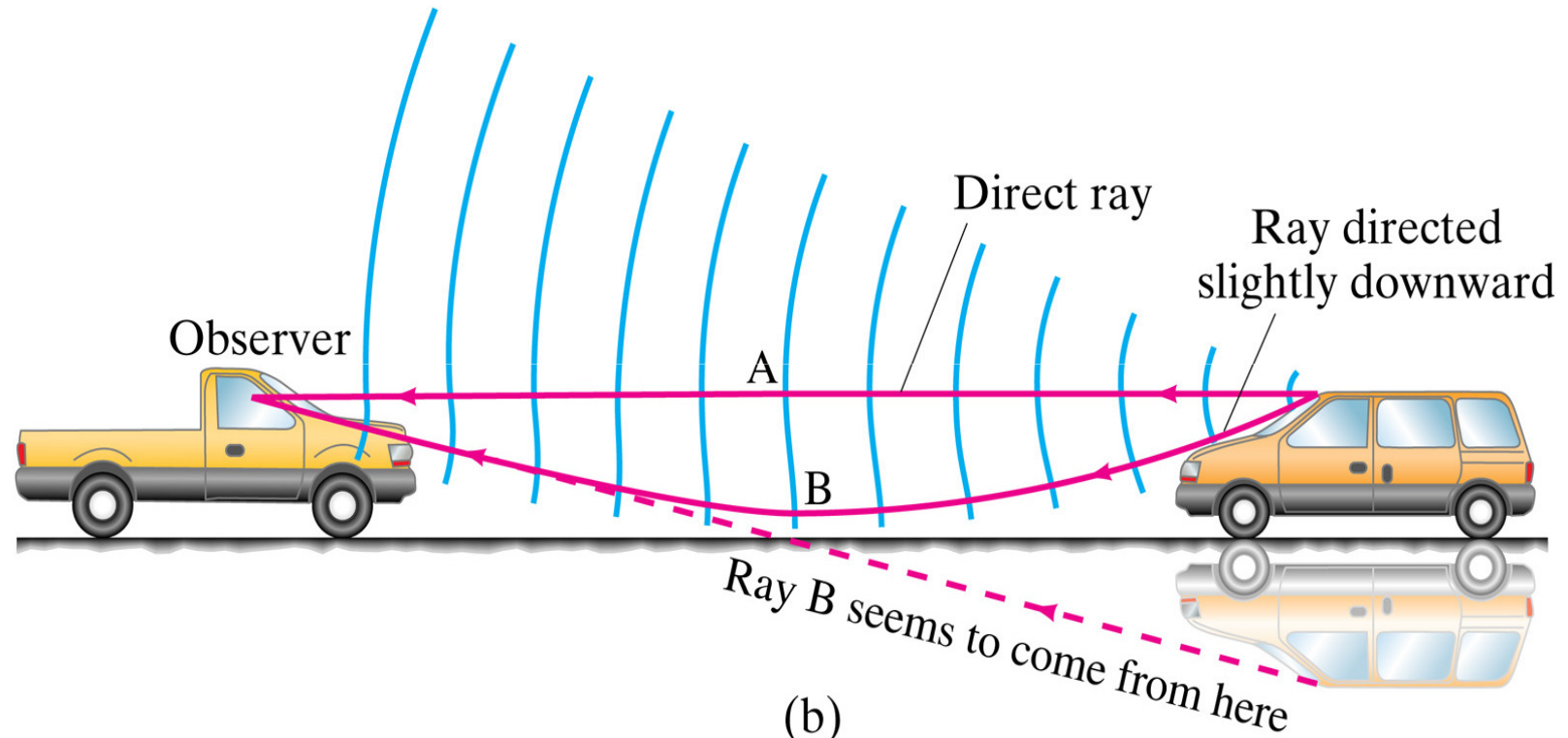
Lom žarkov



Globinski lomni pojav

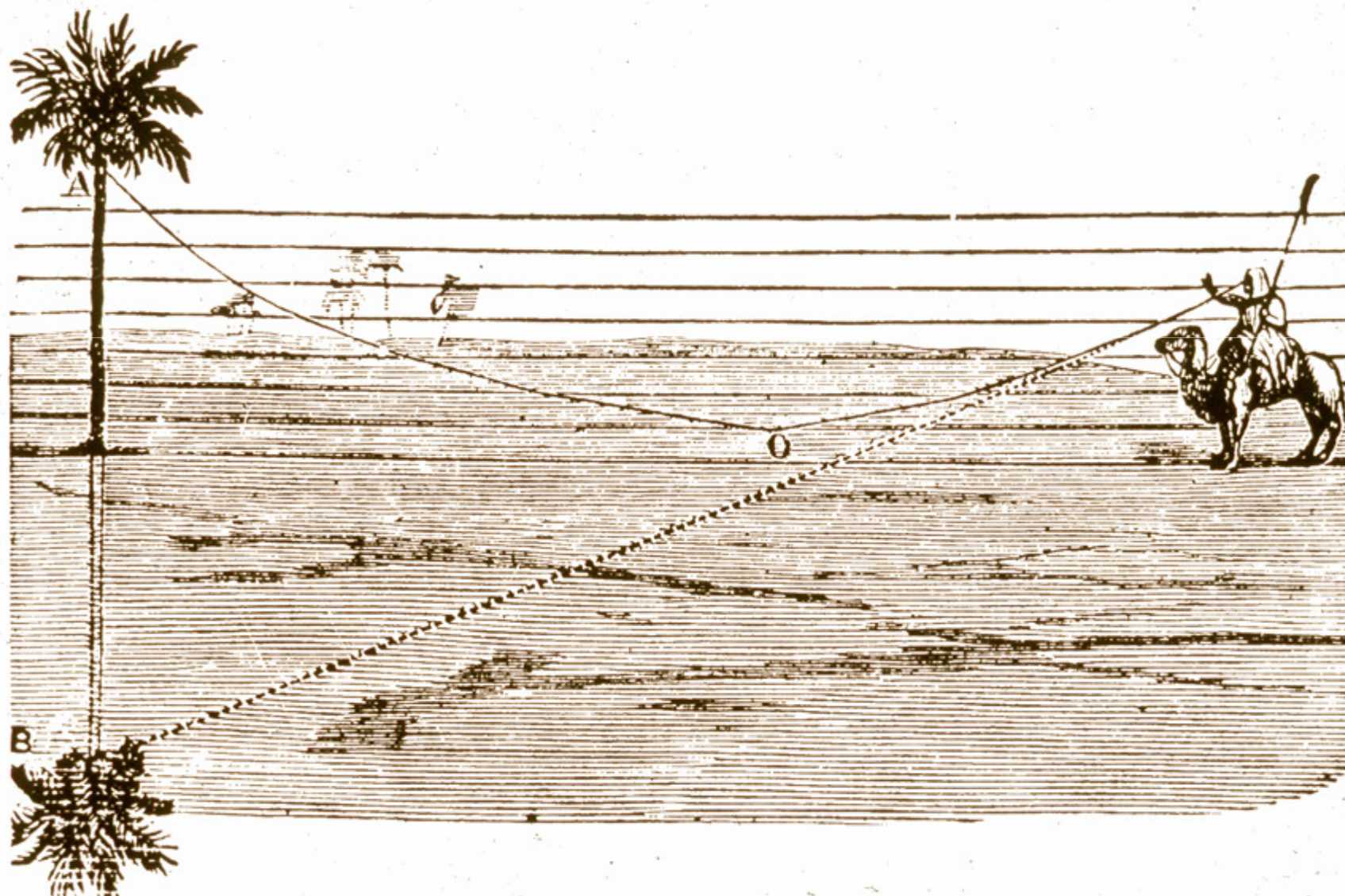


Subrefrakcija

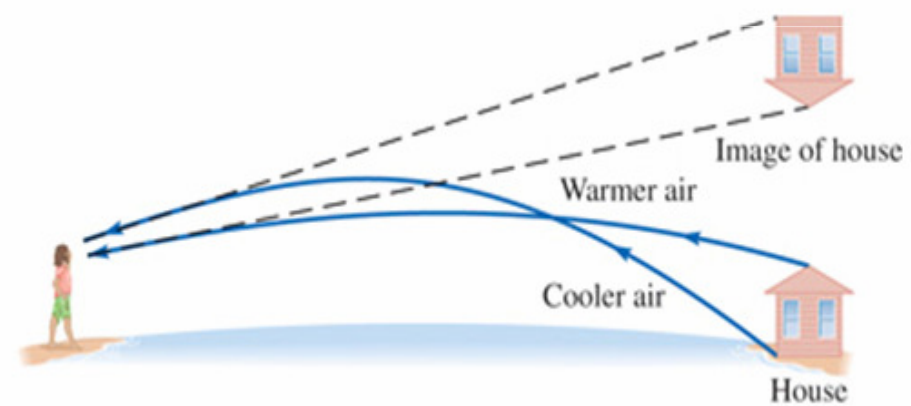


(b)

Subrefrakcija



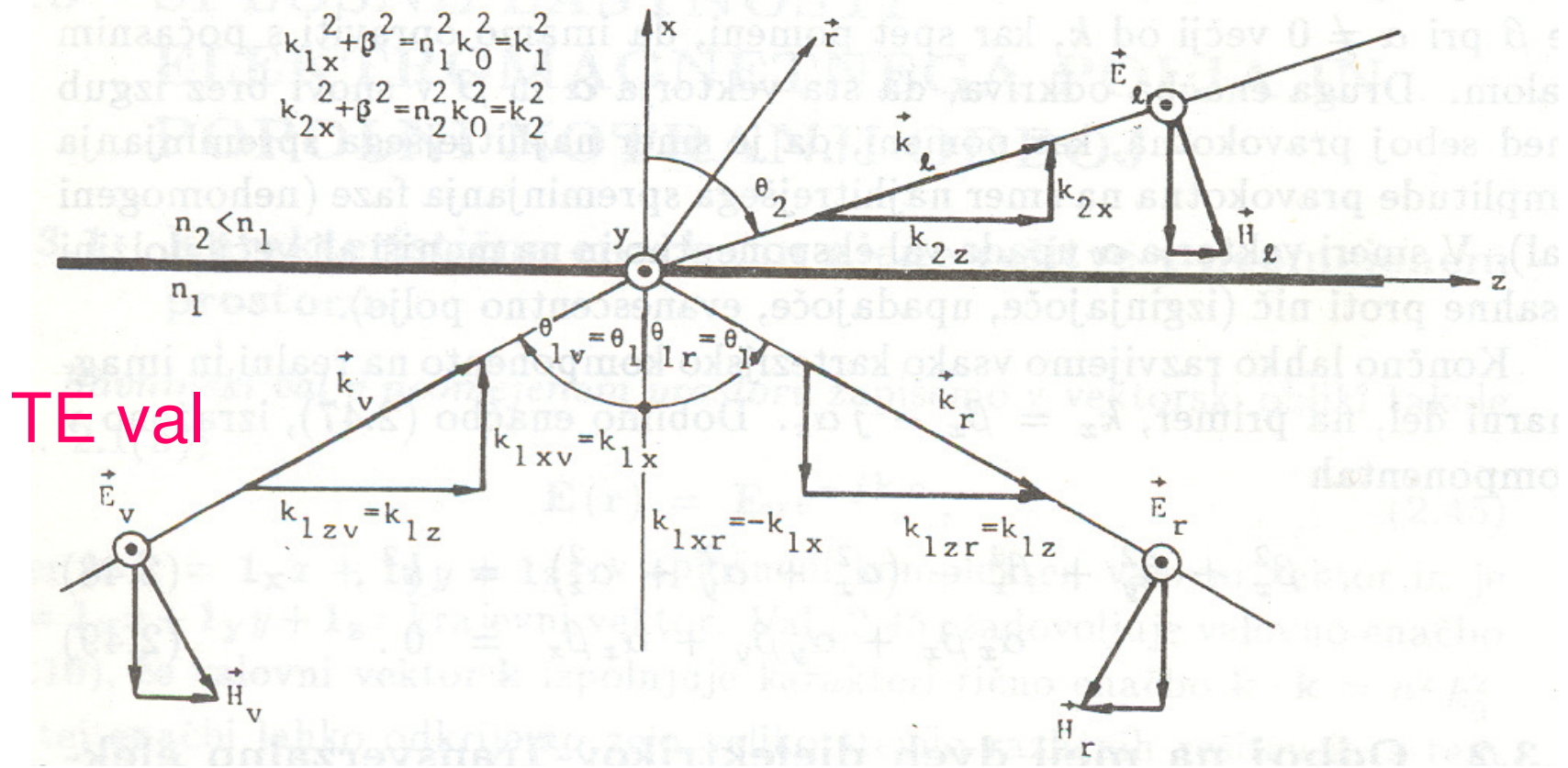
Superrefrakcija



Odboj in lom – mejni pogoji

$$\begin{aligned}
 x < 0 : \quad & k_{1xv}^2 + k_{1zv}^2 = k_1^2 = n_1^2 k_0^2, \quad \text{vpadni val} \\
 & k_{1xr}^2 + k_{1zr}^2 = k_1^2 = n_1^2 k_0^2, \quad \text{odbiti val} \\
 x > 0 : \quad & k_{2x}^2 + k_{2z}^2 = k_2^2 = n_2^2 k_0^2, \quad \text{lomljeni val}
 \end{aligned}$$

$$k_{1zv} = k_{1zr} = k_{1z} = k_{2z} = \beta. \quad (2.53)$$



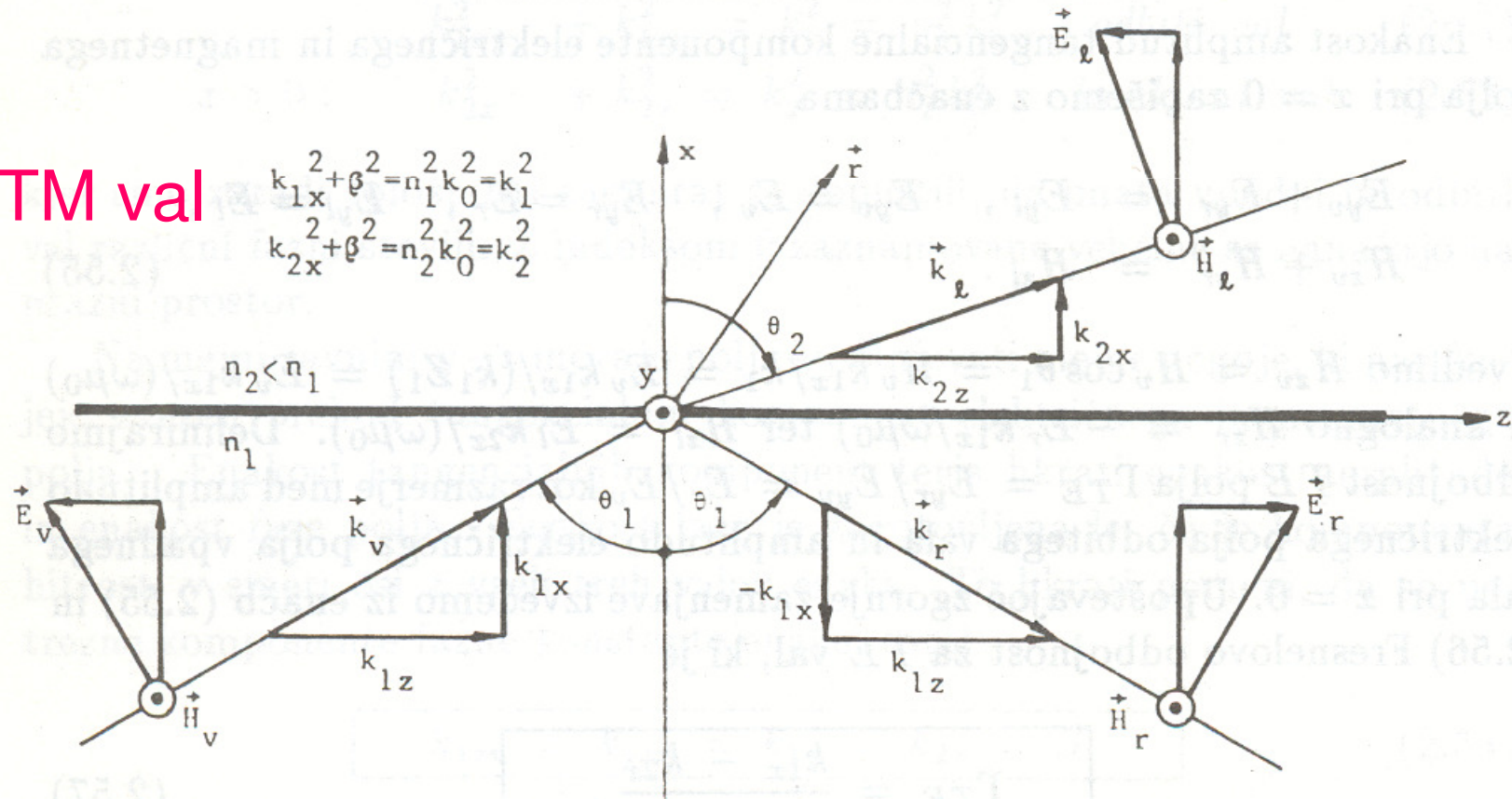
Odboj in lom, odbojnost

$$\Gamma_{TM} = \frac{n_2^2 k_{1x} - n_1^2 k_{2x}}{n_2^2 k_{1x} + n_1^2 k_{2x}} \quad (2.60)$$

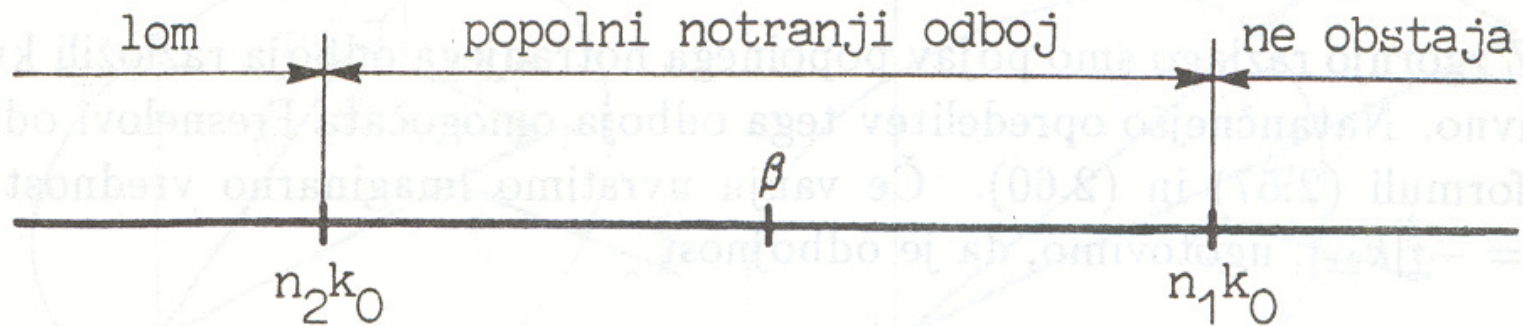
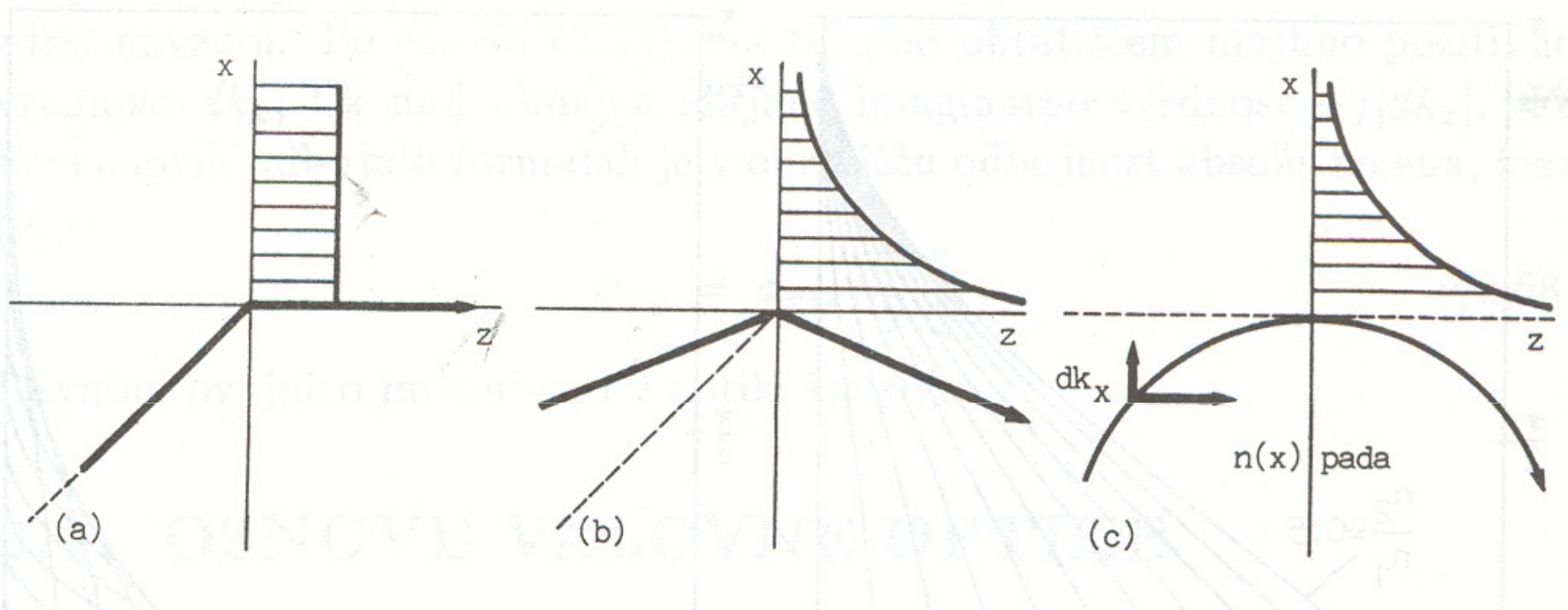
TM val

$$k_{1x}^2 + \beta^2 = n_1^2 k_0^2 = k_1^2$$

$$k_{2x}^2 + \beta^2 = n_2^2 k_0^2 = k_2^2$$

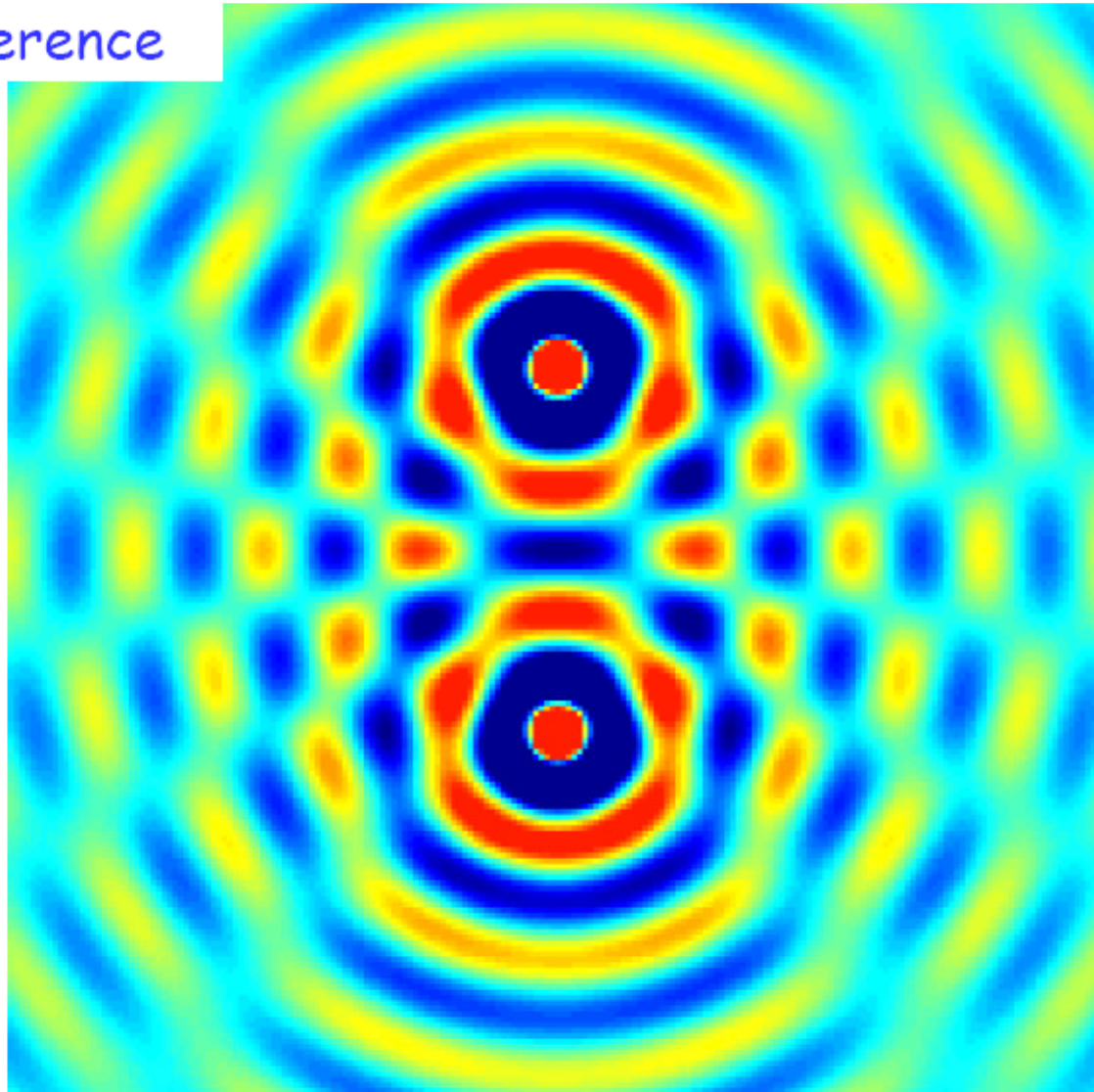


Totalni odboj – evanescentno polje



Interferenca

Interference



7 of 96

Nezr

2 Windows ... 2 Microsoft ... Prejeto - Outl... 8 Paint http://www.tc...

Princip superpozicije

Posamezna signala:

$$y_1(x, t) = A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x)$$

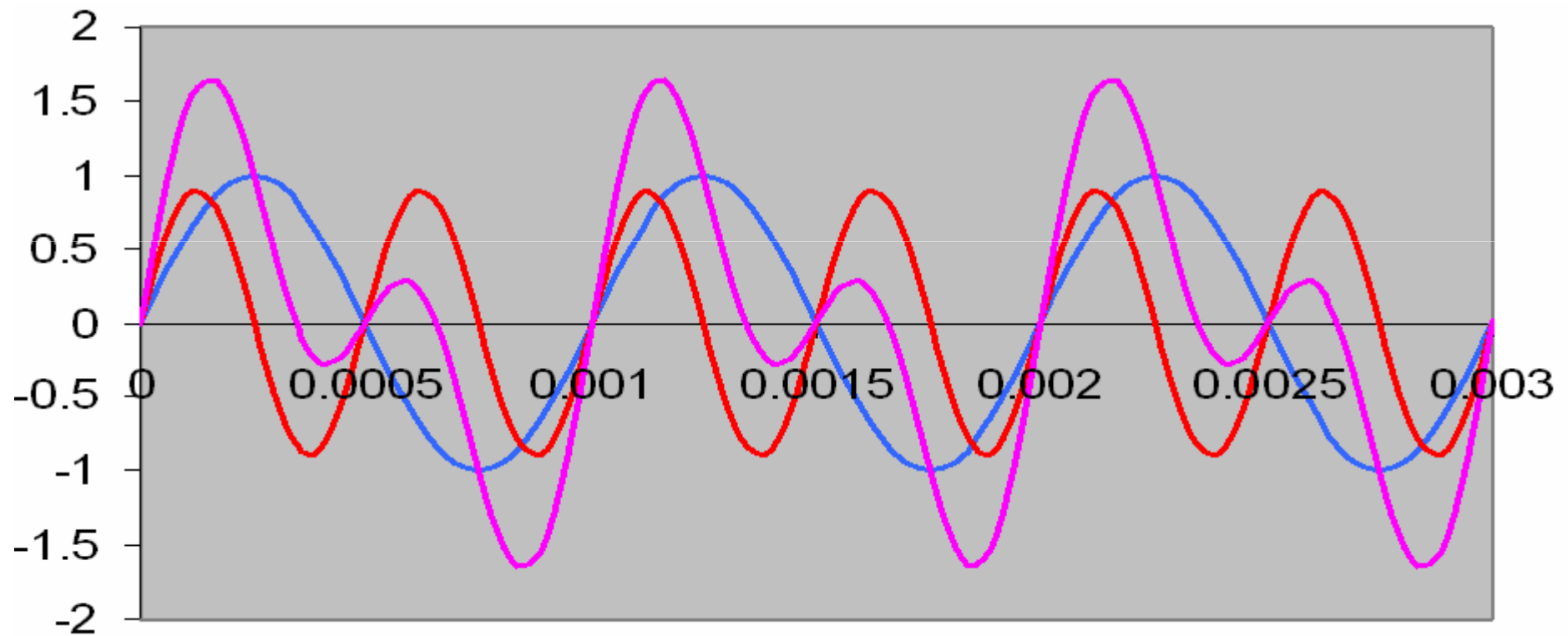
$$y_2(x, t) = A_2 \sin(\omega_2 t + k_2 x)$$

Signal po superpoziciji:

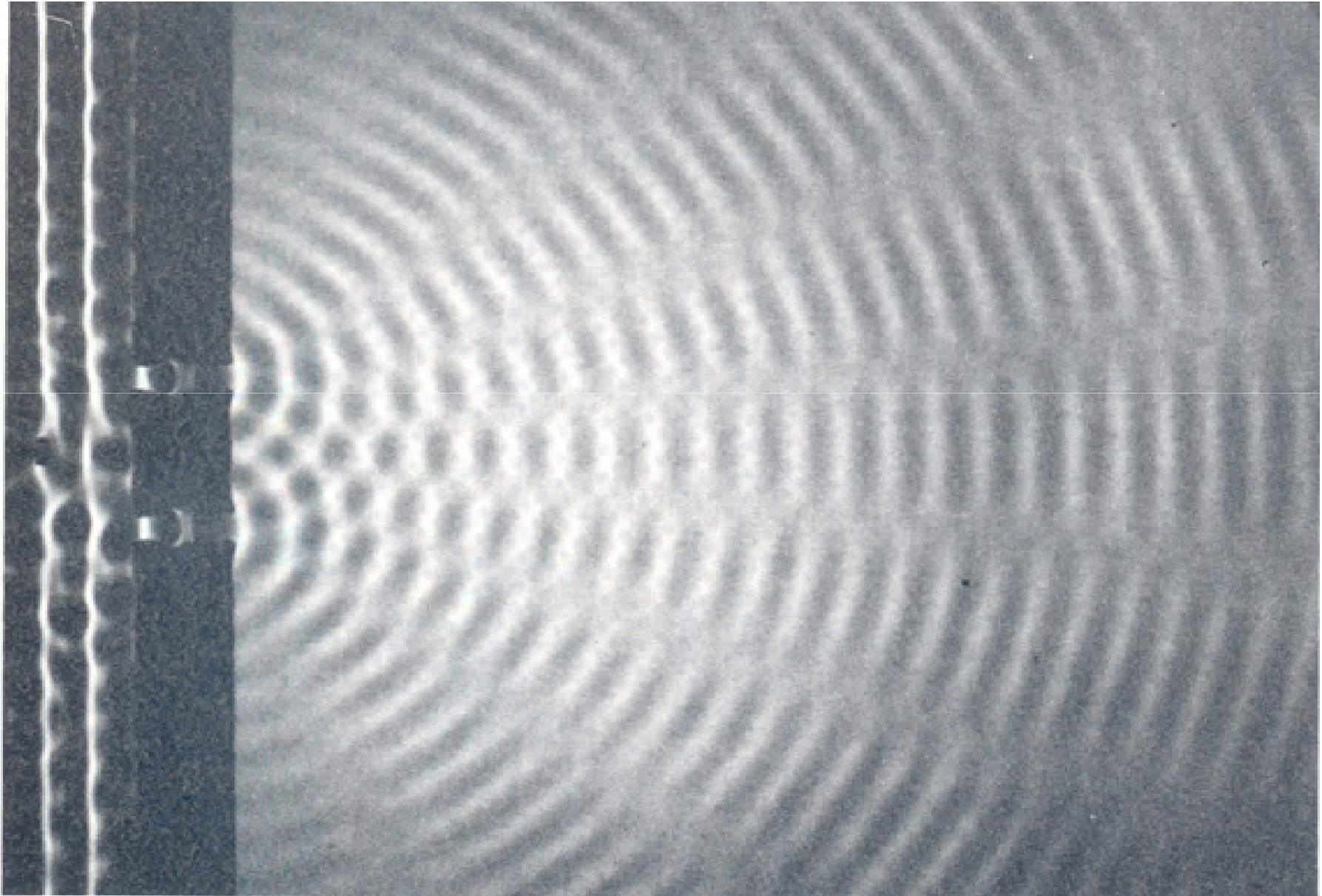
$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) =$$

$$A_1 \sin(\omega_1 t - k_1 x) + A_2 \sin(\omega_2 t + k_2 x)$$

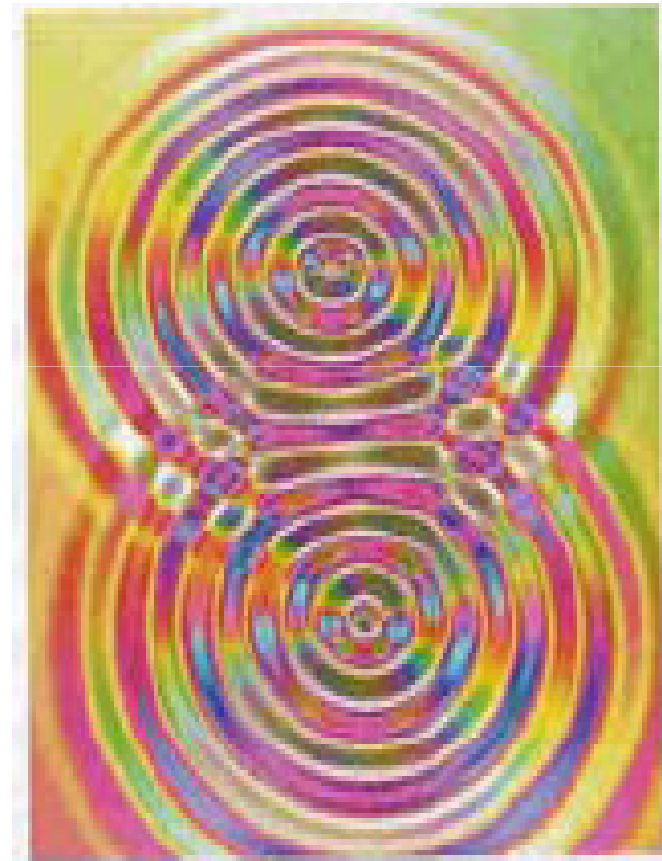
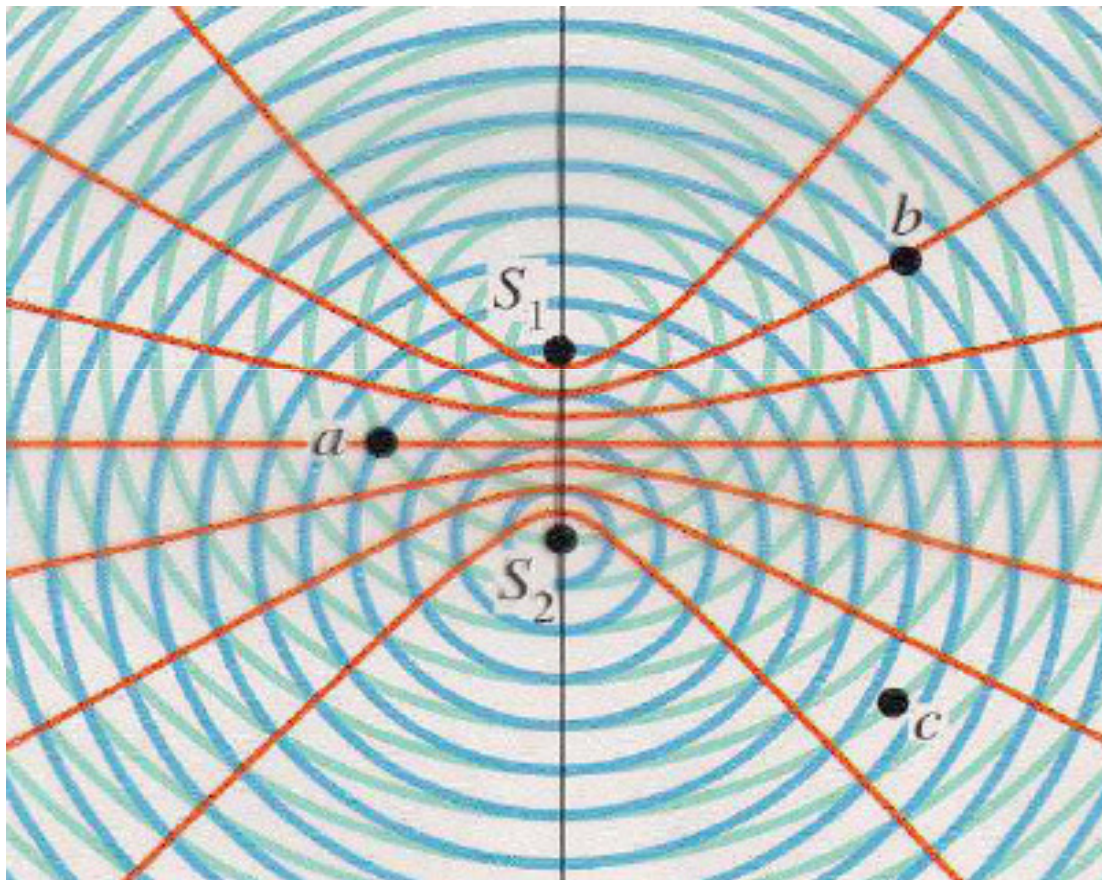
Superpozicija



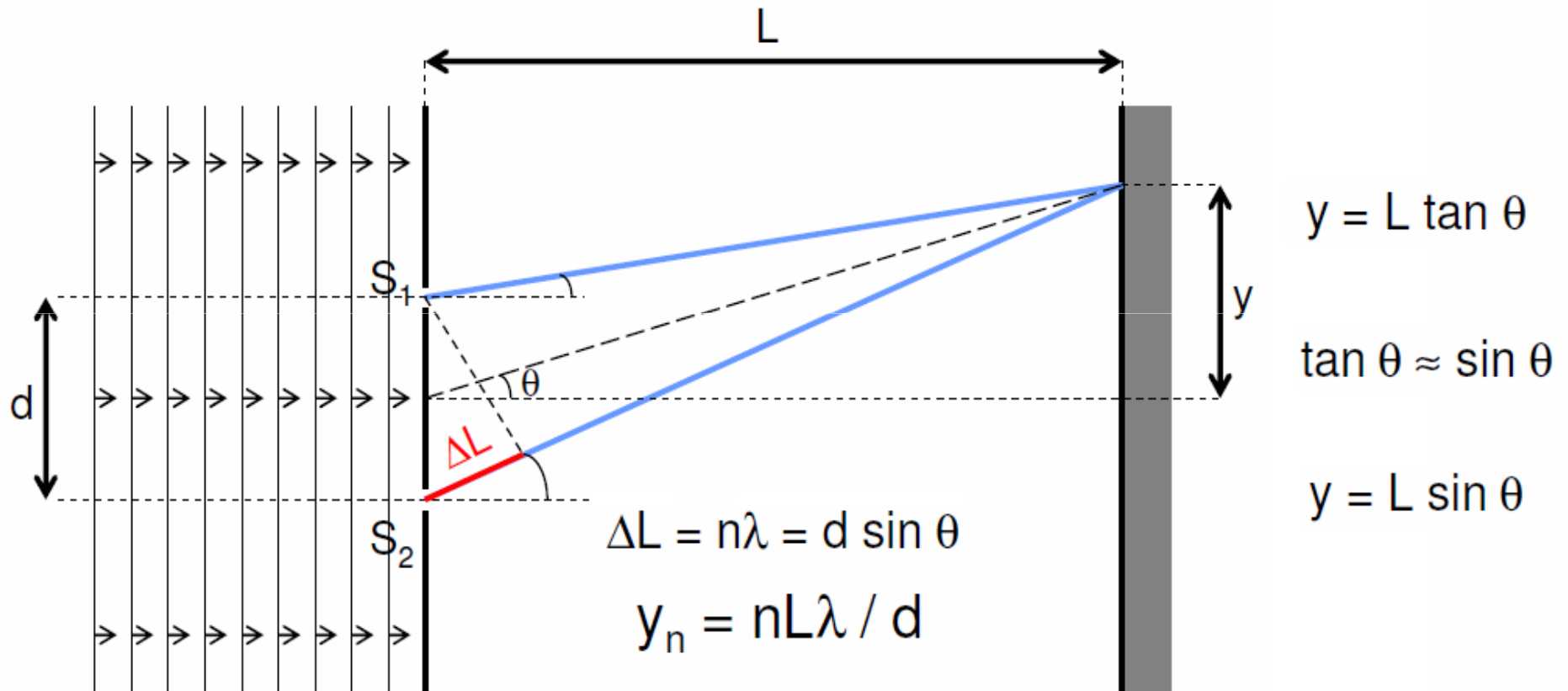
Interferenca



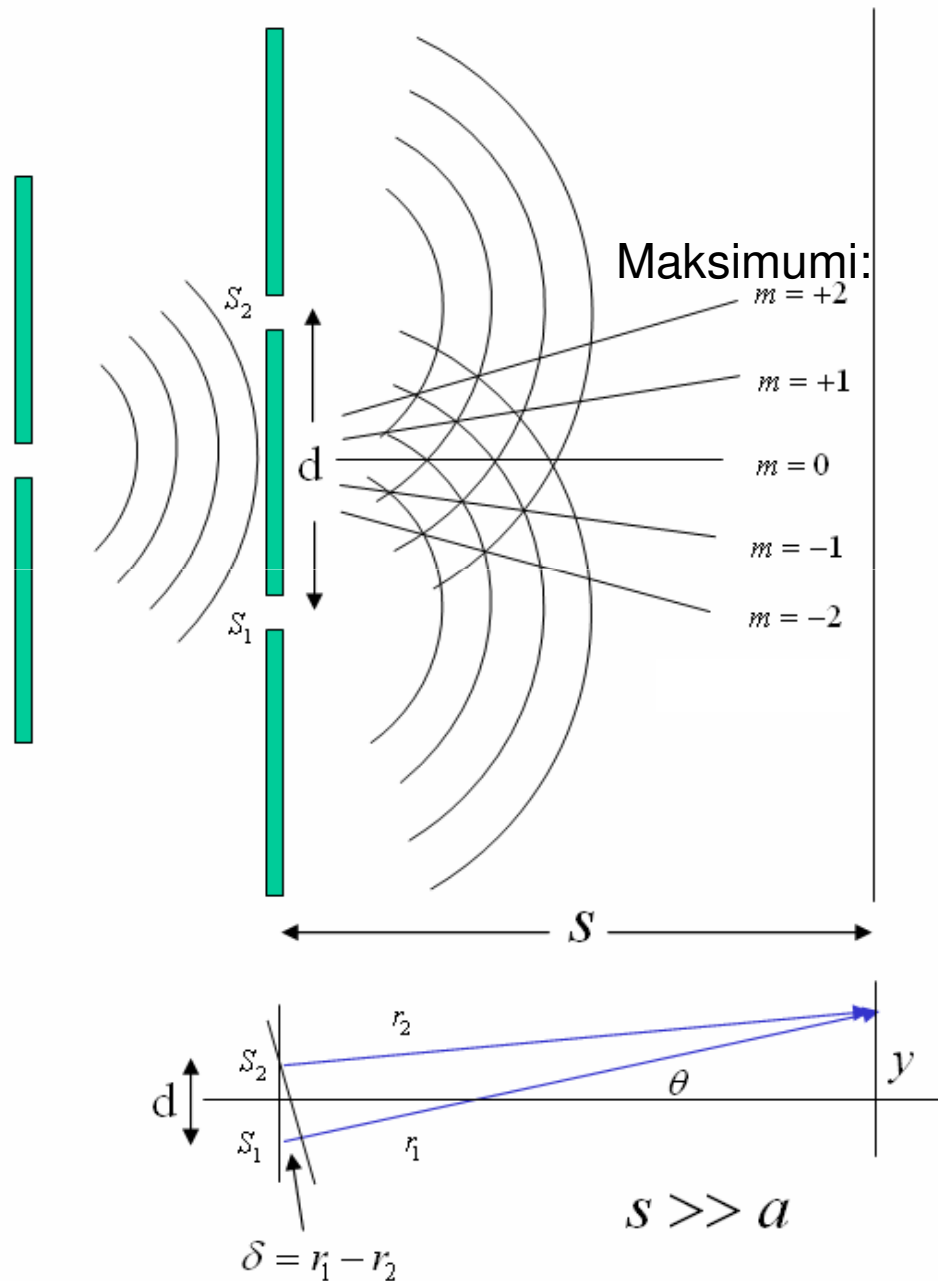
Interferenca dveh krožnih virov



Interferenca dveh sofaznih virov



Youngov poskus



Maksimumi se pojavijo pri:

$$\delta = r_1 - r_2 = m\lambda$$

$$\sin \theta \approx \frac{\delta}{d}$$

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

Minimumi se pojavijo pri:

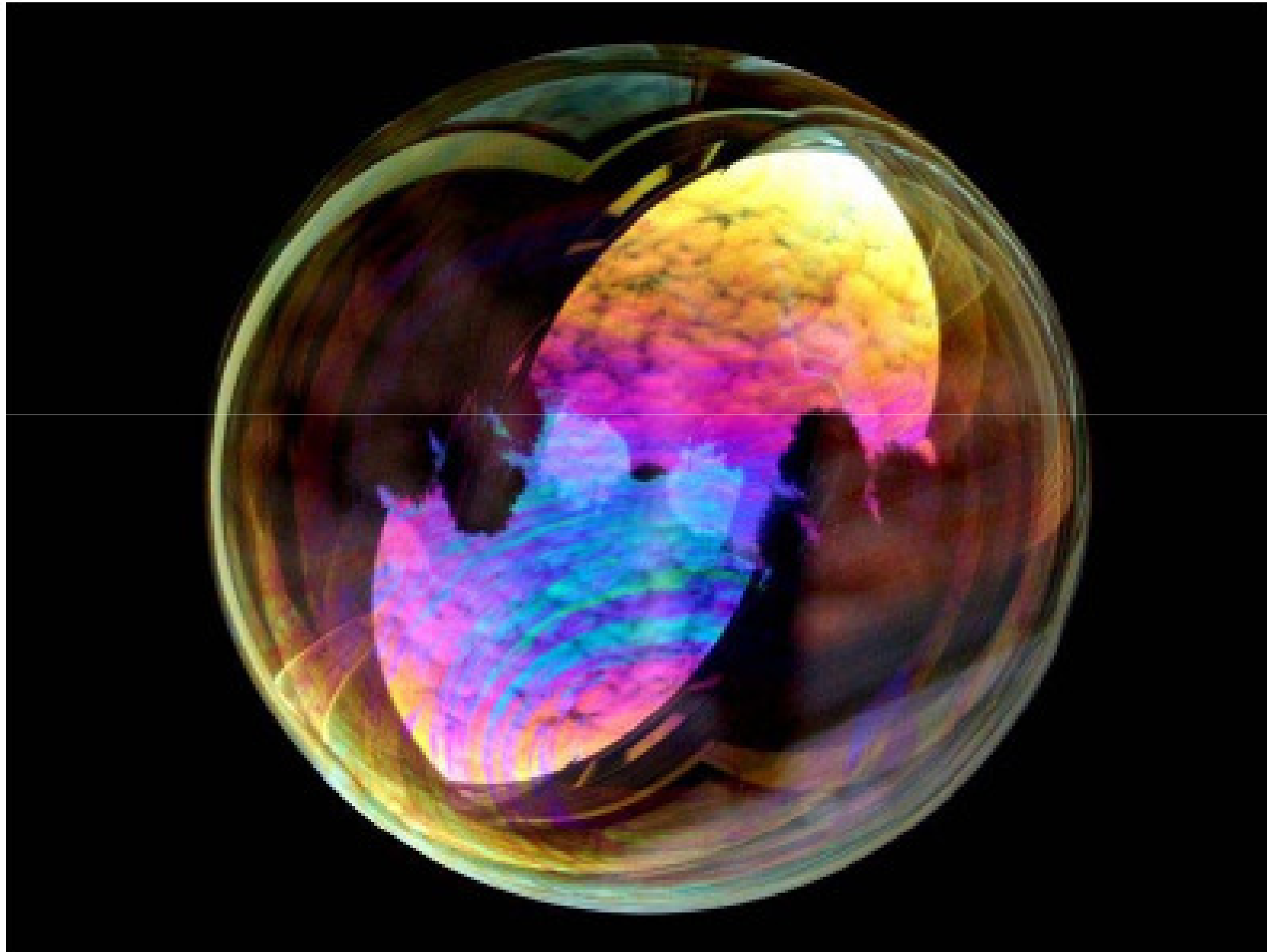
$$\delta = r_1 - r_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

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

Interferenca na tankih površinah



Interferenčne barve milnega mehurčka



Interferenca na klinu

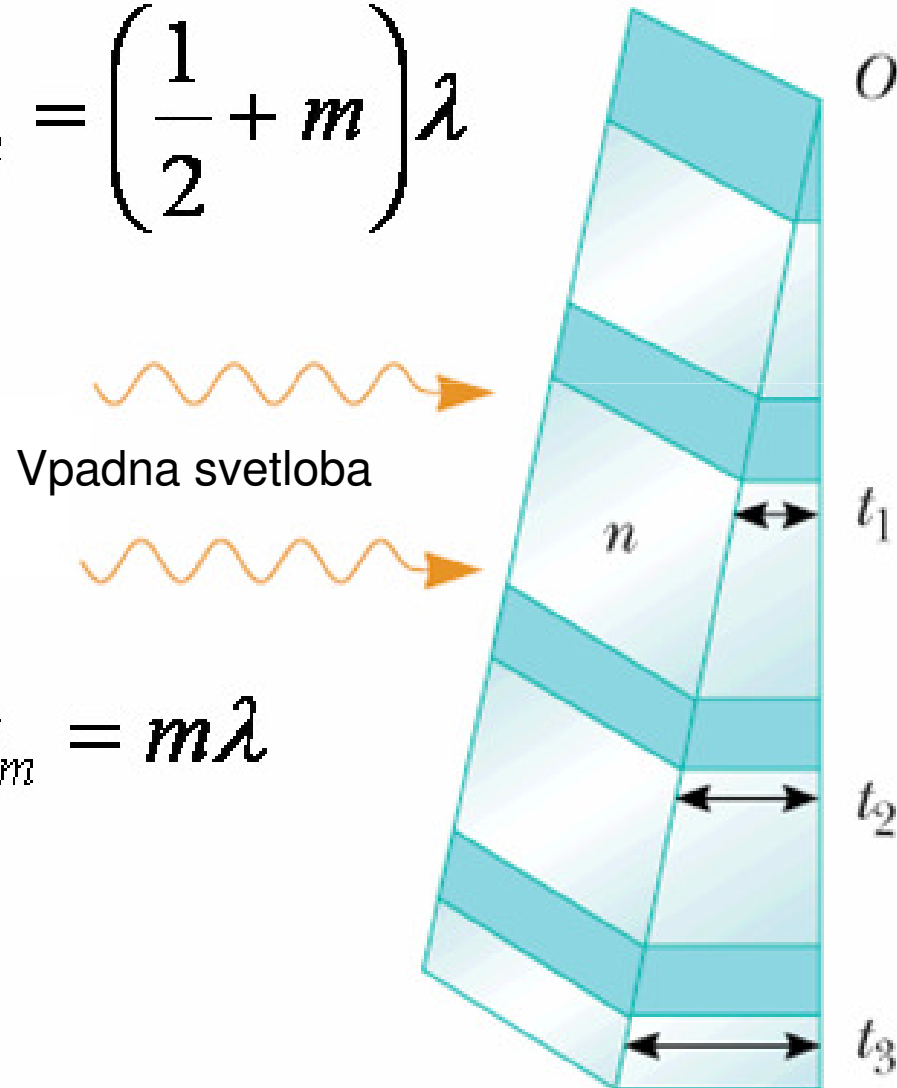
Konstruktivna
interferenca

$$2nt_m = \left(\frac{1}{2} + m \right) \lambda$$

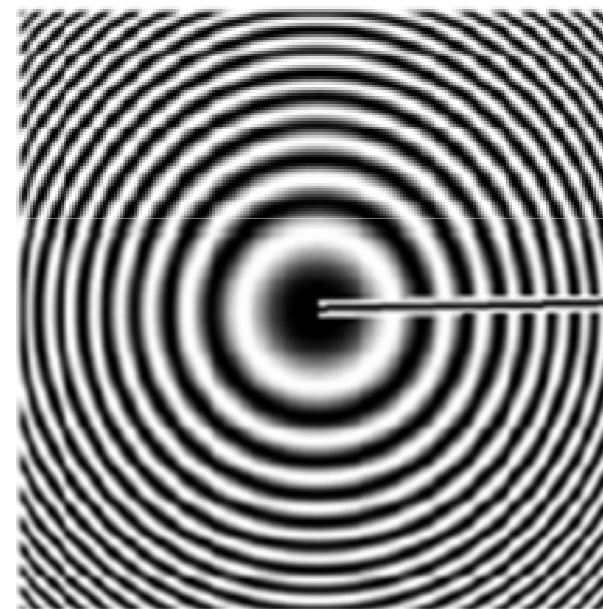
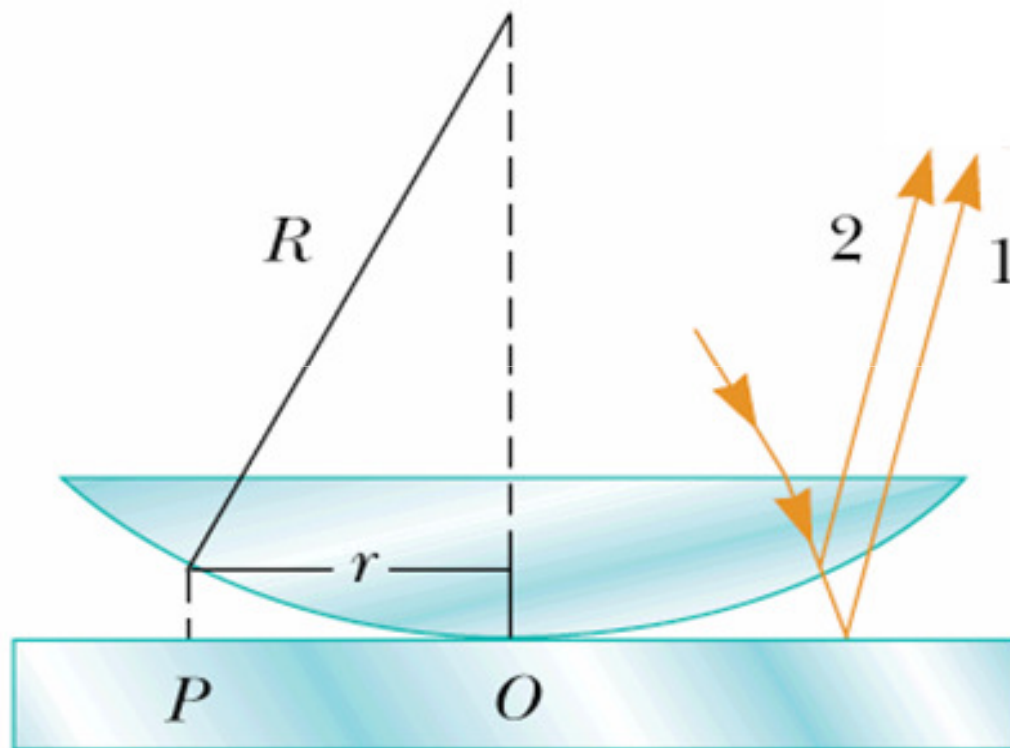
Vpadna svetloba

Destruktivna
interferenca

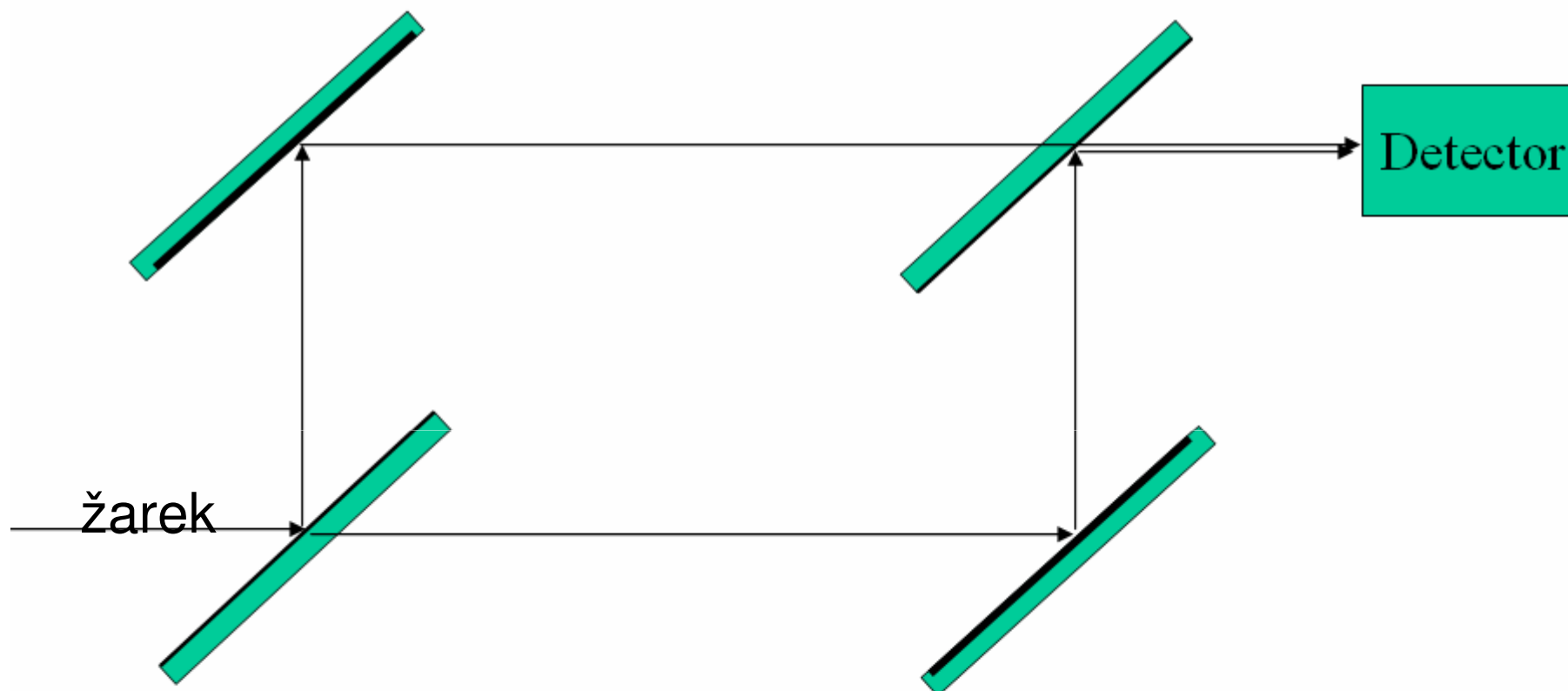
$$2nt_m = m\lambda$$



Newtonovi kolobarji



Mach-Zehnderjev interferometer



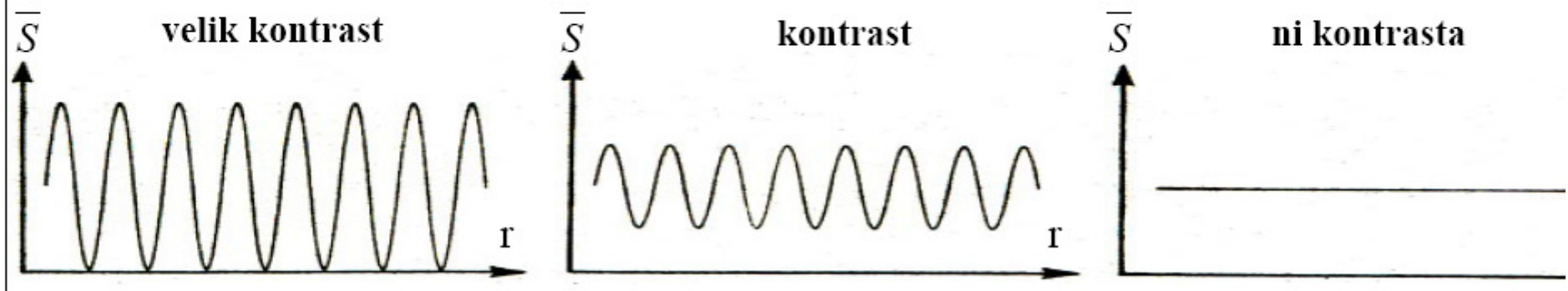
Vrste interferometrov:

- Michelsonov interferometer
- Mach-Zehnderjev interferometer
- Sagnacov interferometer

1.4 INTERFERENCA IN ADITIVNOST

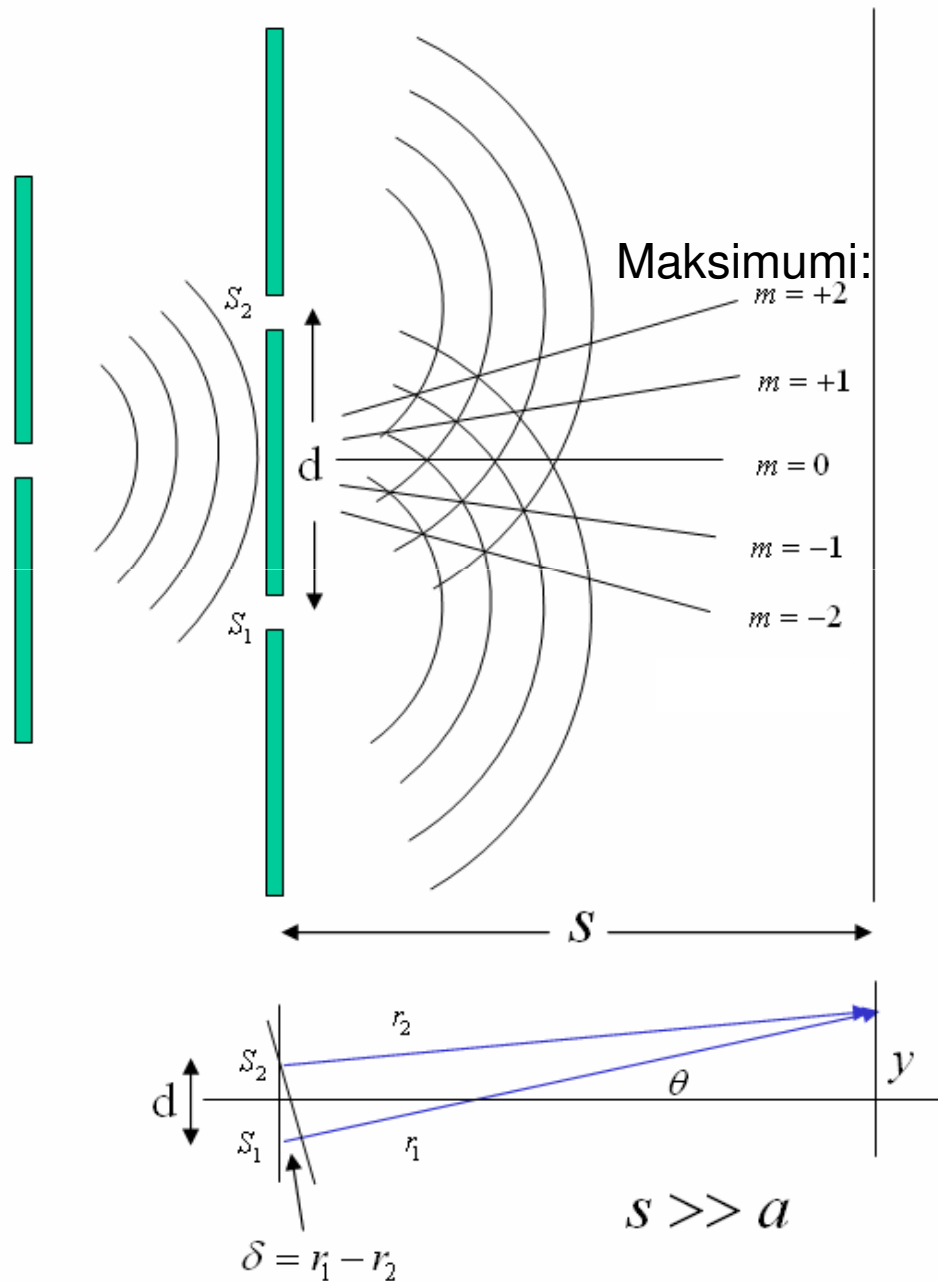
Superpozicija polja virov 1 in 2. Zapis kompleksne amplitude polja: $E(r, t) = A(r, t)e^{j\phi}$

Koherentno polje	Delno koherentno polje	Nekoherentno polje
$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = \max$ $\gamma = 1$ $\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + 2\sqrt{\bar{S}_1 \bar{S}_2} \cos \phi$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} \neq 0$ $0 < \gamma < 1$ $\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \frac{1}{Z_0} \operatorname{Re} \left[\overline{E_1 E_2^*} \right]$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = 0$ $\gamma = 0$ $\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2$



KOHERENCA: aditivnost po polju (ni aditivnosti po moči)

Youngov poskus



Maksimumi se pojavijo pri:

$$\delta = r_1 - r_2 = m\lambda$$

$$\sin \theta \approx \frac{\delta}{d}$$

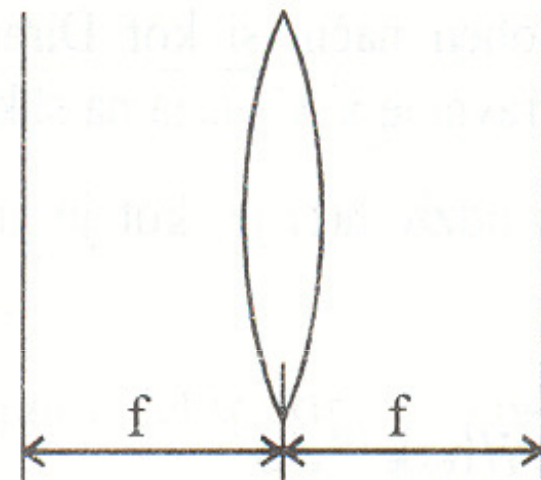
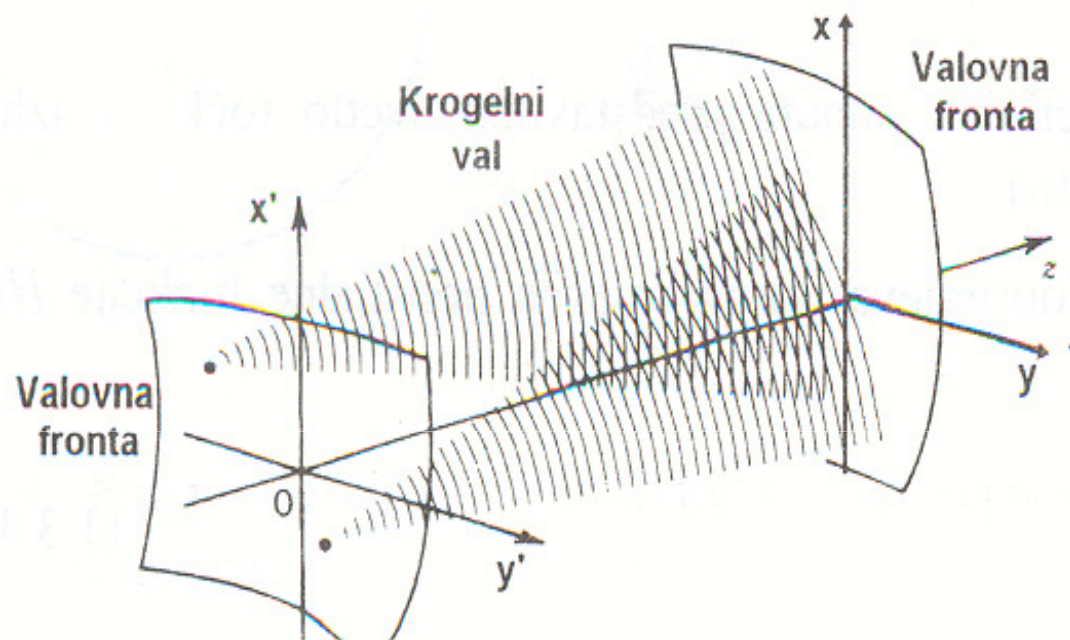
$$\delta \approx d \sin \theta = m\lambda$$

Minimumi se pojavijo pri:

$$\delta = r_1 - r_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

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

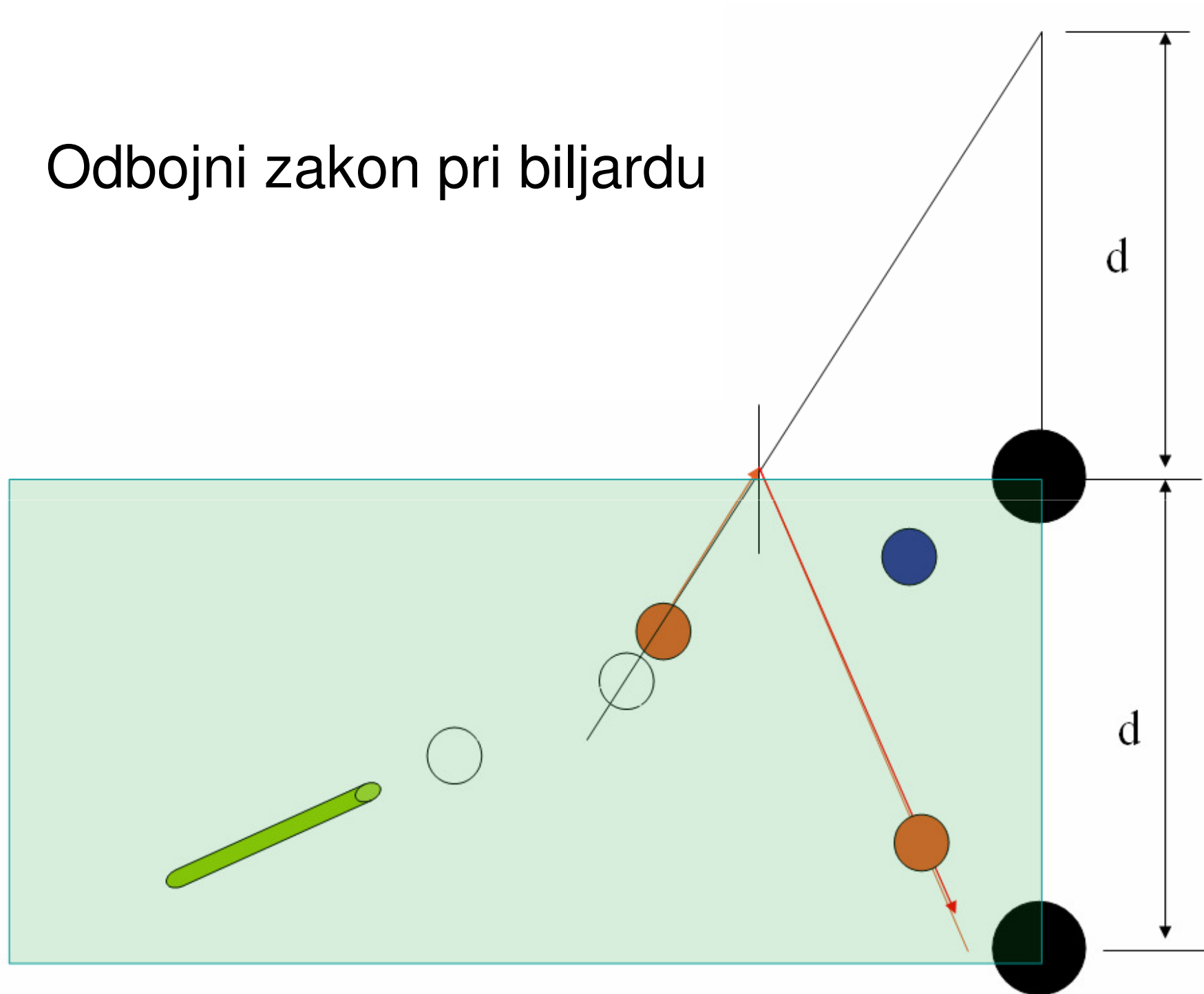
Fourierova transformacija z lečo



$$E_2(x, y) = h_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x', y') e^{-j \frac{k}{f}(xx' + yy')} dx' dy',$$

Geometrijska optika

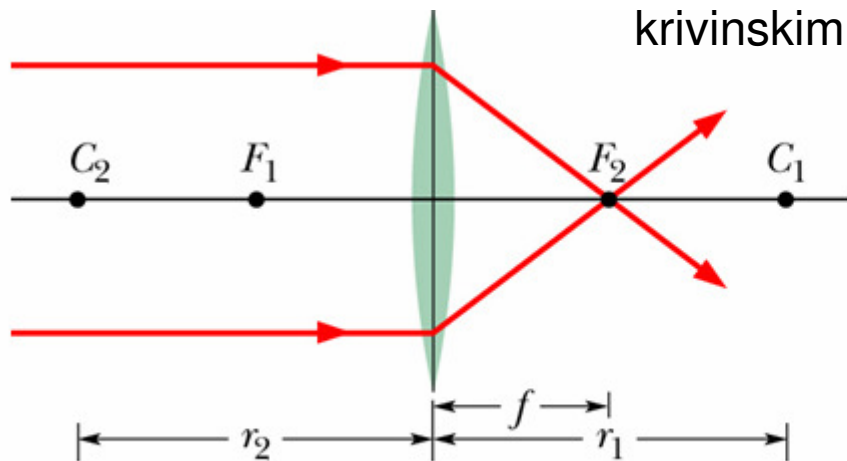
Odbojni zakon pri biljardu



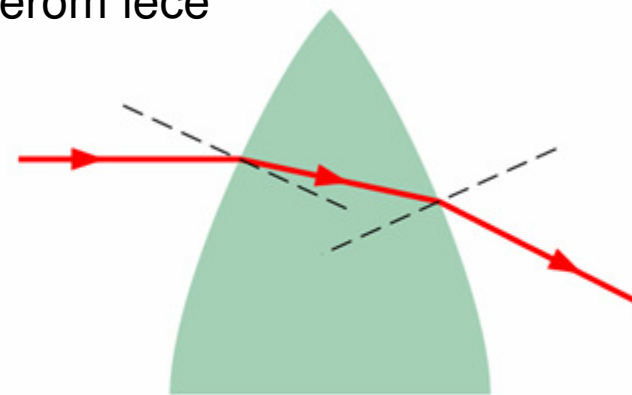
Optika tanke* leče

- Debelina majhna v primerjavi z razdaljami in krivinskim polmerom leče

Zbiralna leča

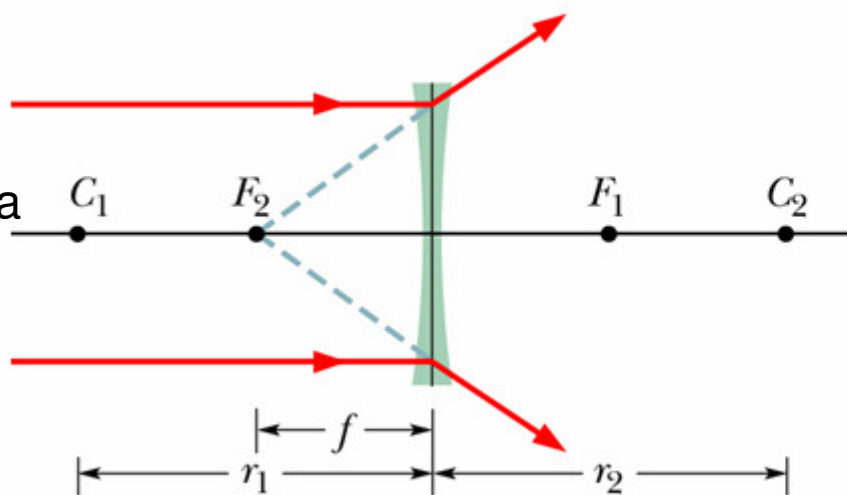


(a)

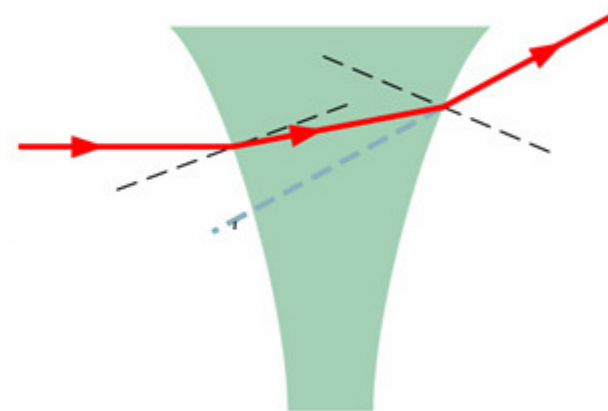


(b)

Razpršilna leča

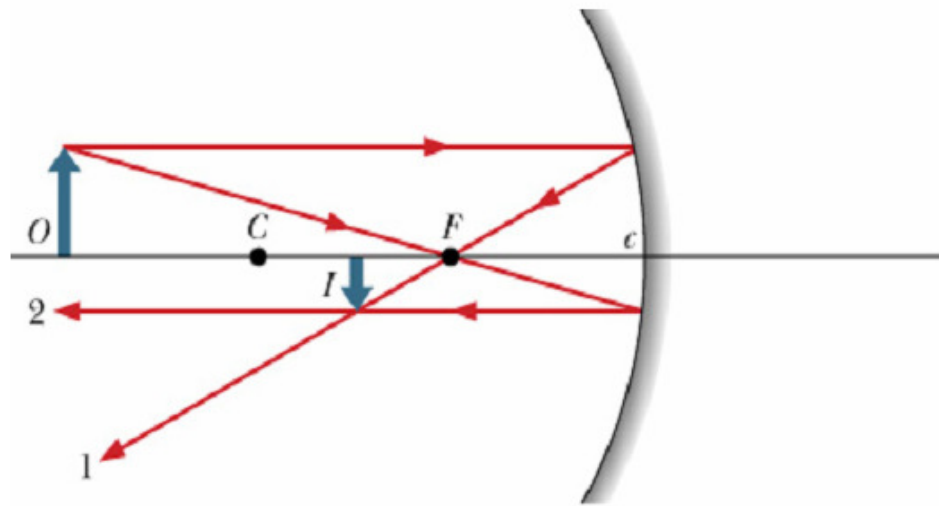


(c)

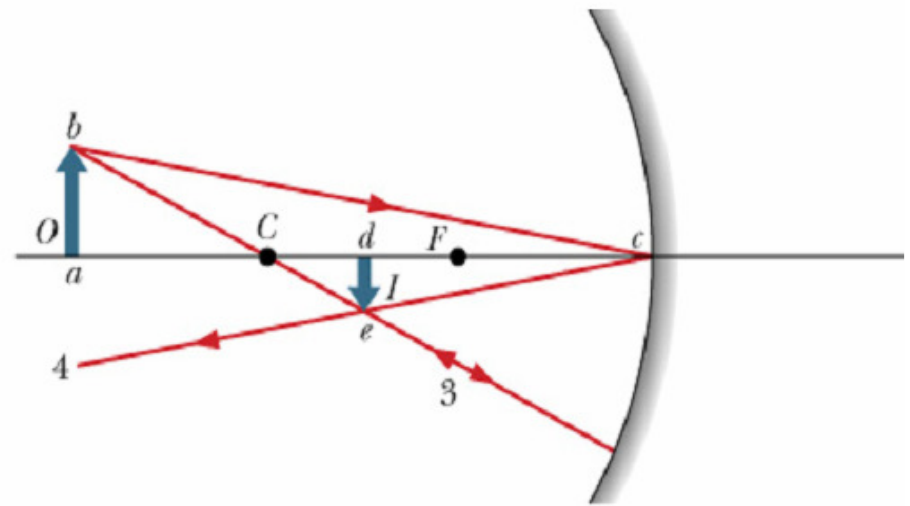


(d)

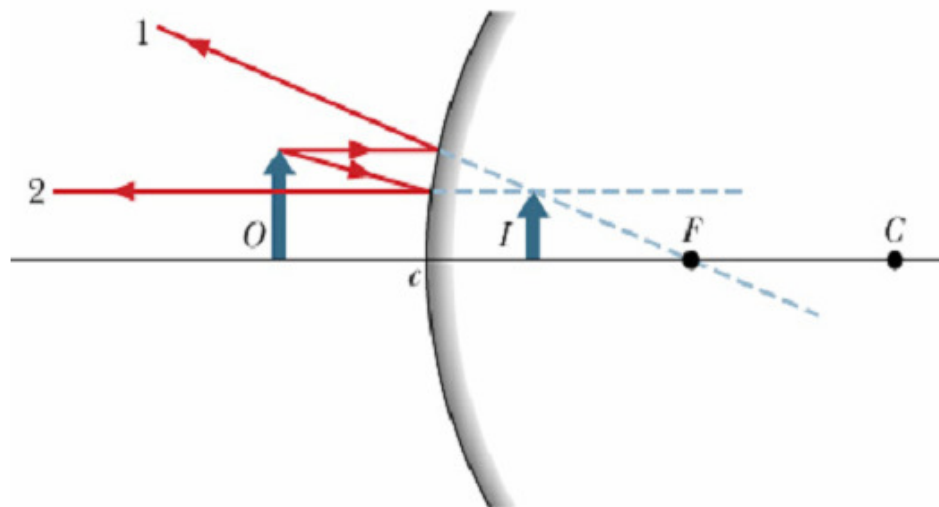
Optika zrcala



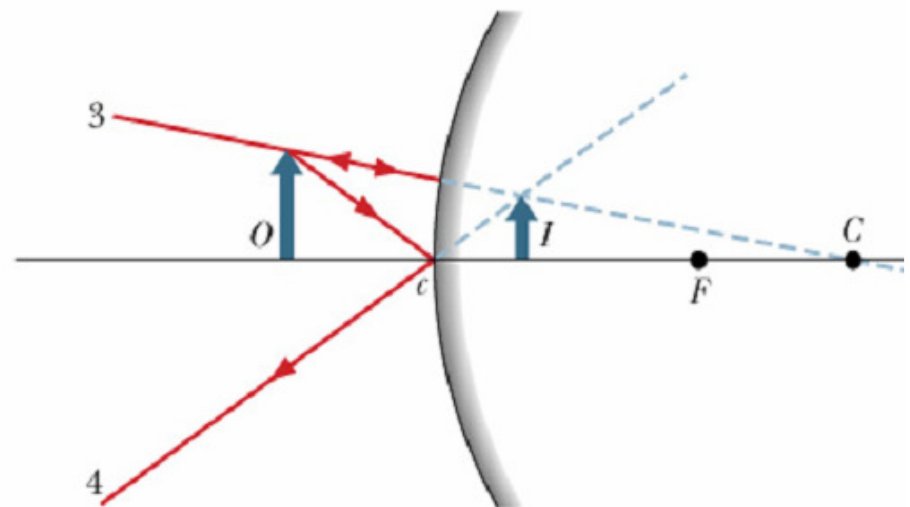
(a)



(b)

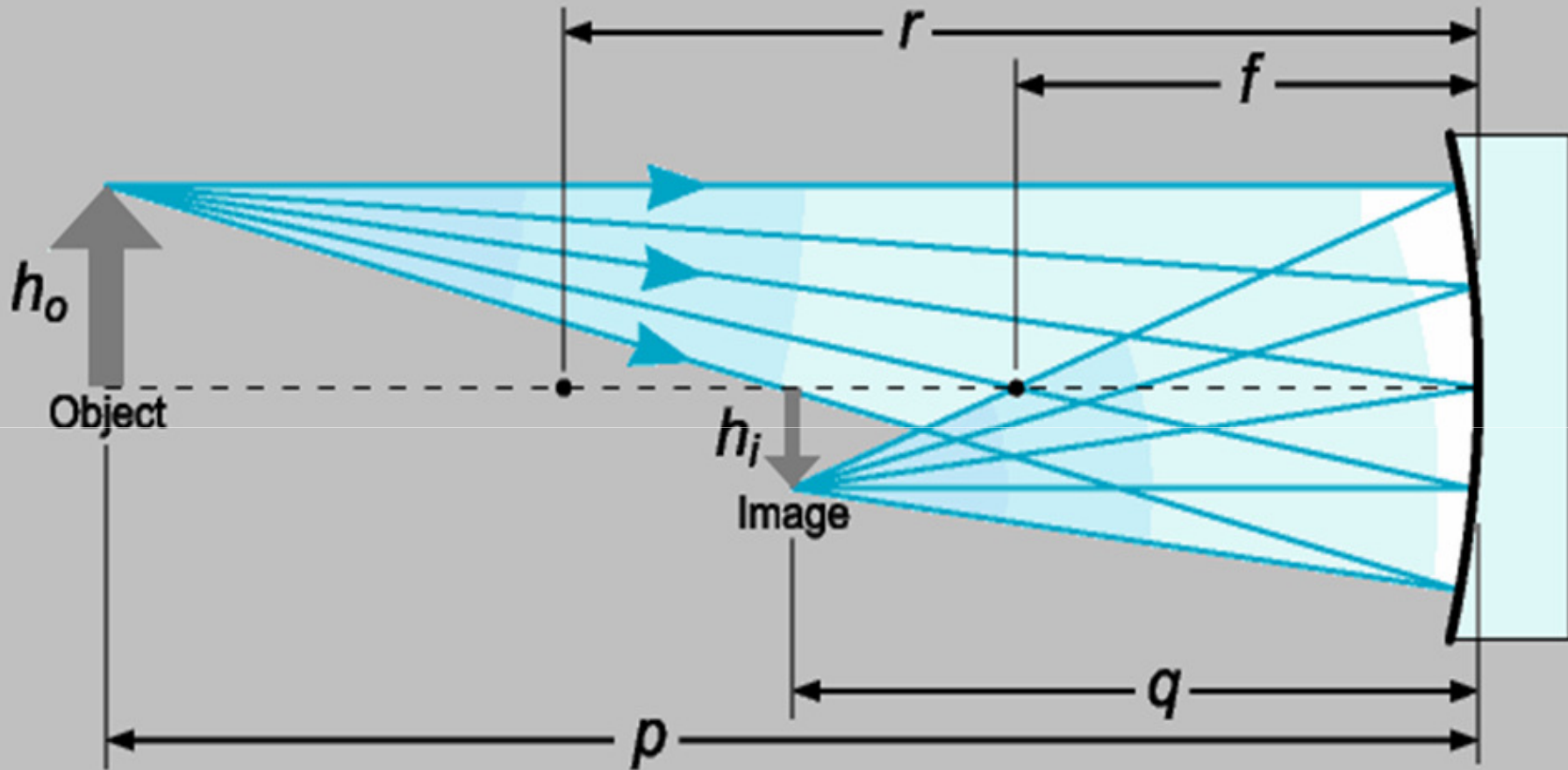


(c)



(d)

Enačba zrcala



Mirror Equation:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{2}{r}$$

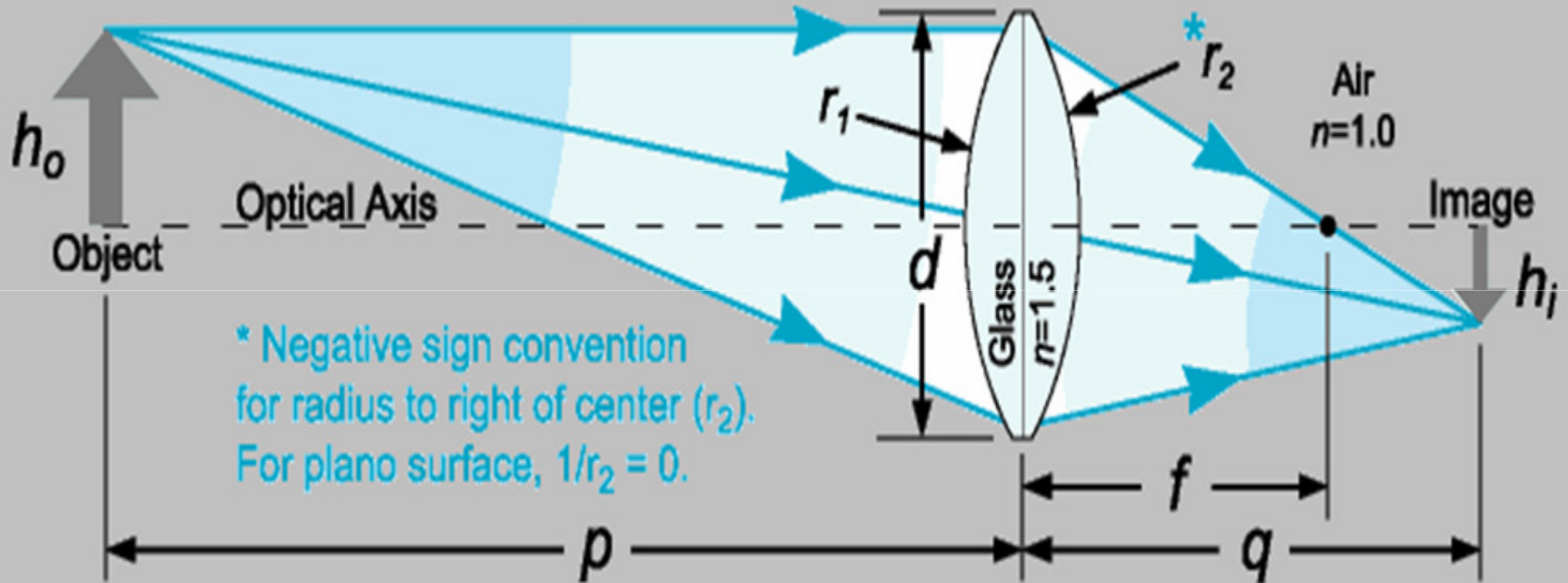
Principal Focus:

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

Magnification:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{q}{p}$$

Enačba leče



Lens Equation: Lens Maker's Equation: Magnification: F-number:

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

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{q}{p}$$

$$f/\# = \frac{f}{d}$$

Polarizacija

Vrste polarizacije

1. Linearna polarizacija L

- polarizacijska baza: horizontalno-vertikalna (H/V, diag. A/B) (dve med seboj ortogonalni vektorski smeri)

2. Krožna polarizacija K

- polarizacijska baza: krožna desno- in levosučna (KD, KL)

3. Eliptična polarizacija E

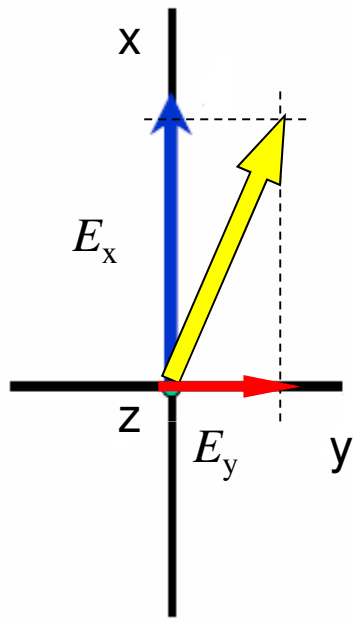
- polarizacijska baza: eliptična desno- in levosučna (ED, EL) (dve poljubno orientirani med seboj ortogonalni elipsi enake sploščenosti in nasprotne smeri sukanja)

4. Stopnja polarizacije

- Popolnoma polarizirano (koherentno), delno polarizirano in nepolarizirano (nekoherentno) polje oz. šum.

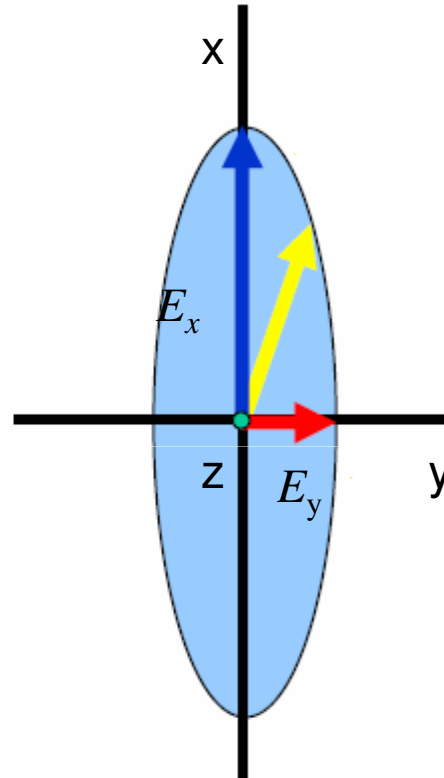
Tri vrste polarizacije

Linearna



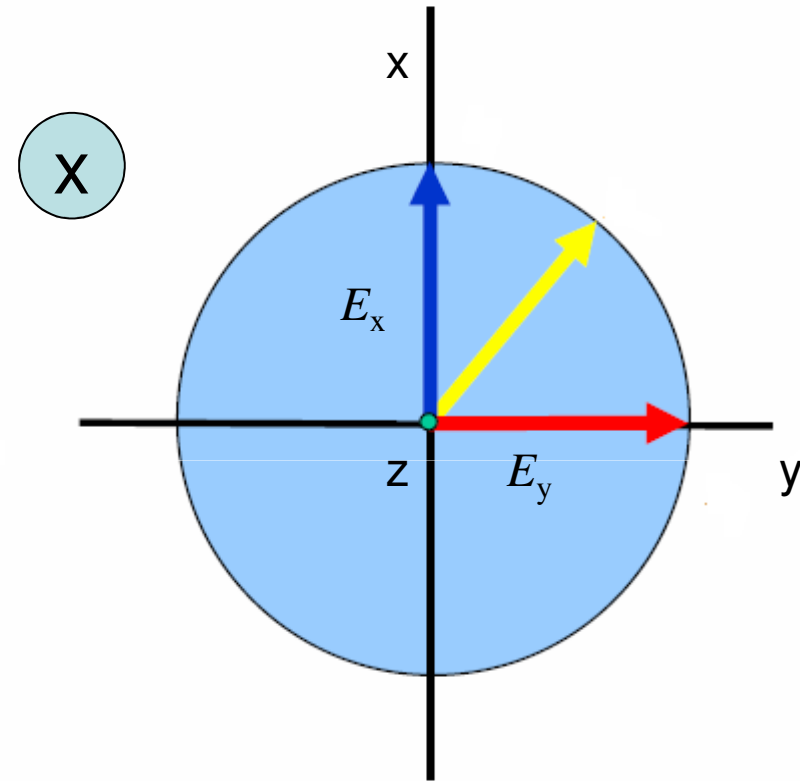
$$|E_x| = k |E_y|$$
$$\delta = 0$$

Eliptična



$$|E_x| = k |E_y|$$
$$\delta \text{ poljuben}$$

Krožna



$$|E_x| = |E_y|$$
$$\delta = \pm \pi/2$$

Linearna in krožna polarizacija sta poseben primer splošne eliptične polarizacije

Krajevno-časovna vrednost polja

Splošni zapis trenutne vrednosti poljubno polariziranega ravninskega vala

$$\mathbf{E}(z,t) = \text{Re} [\mathbf{e} A e^{j(\omega t - kz)}], \quad A = \text{konst.}$$

\mathbf{e} v splošnem enotski kompleksen vektor polarizacije

1. Linearna polarizacija:

\mathbf{e} realen vektor $\mathbf{e} \times \mathbf{e}^* = 0$ pogoj linearne polariziranosti

Primer: $\mathbf{e}_1 = \mathbf{1}_x$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{1}_y$

2. Krožna polarizacija:

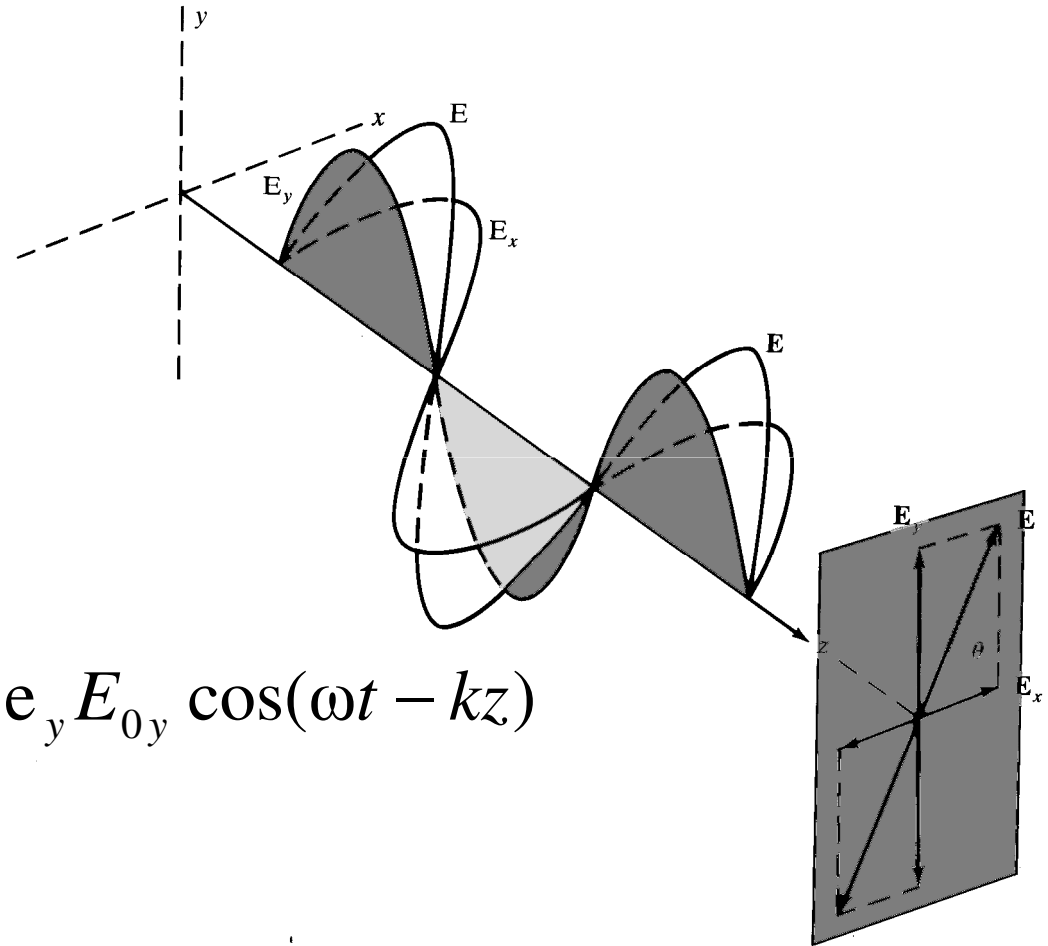
\mathbf{e} kompleksen vektor $\mathbf{e} \cdot \mathbf{e} = 0$ pogoj krožne polariziranosti

Primer: $\mathbf{e}_D = (\mathbf{1}_x - j\mathbf{1}_y)/\sqrt{2}$, $\mathbf{e}_L = (\mathbf{1}_x + j\mathbf{1}_y)/\sqrt{2}$, $\mathbf{1}_x \times \mathbf{1}_y = \mathbf{1}_z$

3. Eliptična polarizacija:

\mathbf{e} kompleksen vektor $\mathbf{e} \times \mathbf{e}^* \neq 0$, $\mathbf{e} \cdot \mathbf{e} \neq 0$ pogoj elip. pol.

Val poljubne linearne polarizacije

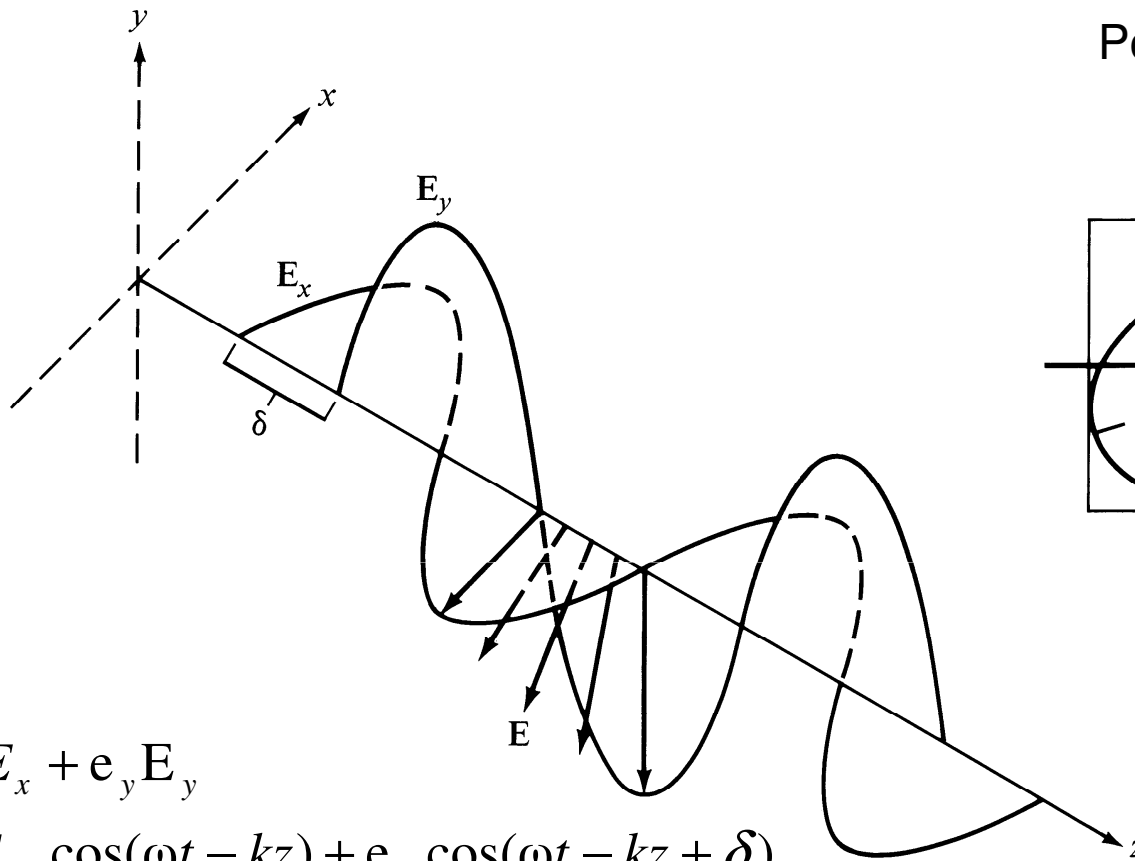


$$\vec{E} = e_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) + e_y E_{0y} \cos(\omega t - kz)$$

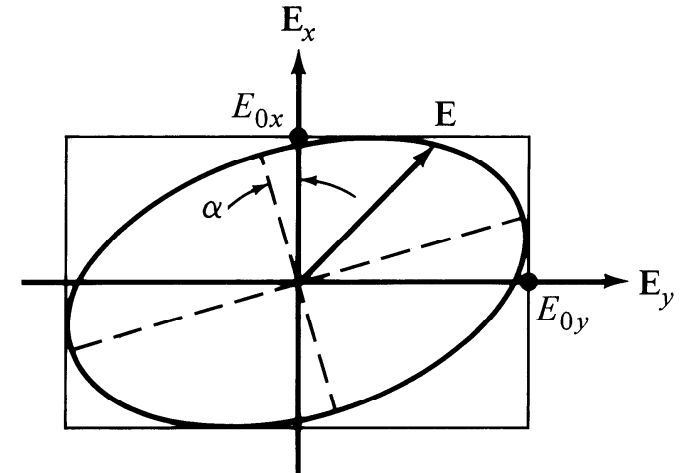
$$E = |\vec{E}| = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right)$$

Val eliptične polarizacije



Polarizacijska elipsa



$$\begin{aligned}\vec{E} &= e_x E_x + e_y E_y \\ &= e_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) + e_y \cos(\omega t - kz + \delta)\end{aligned}$$

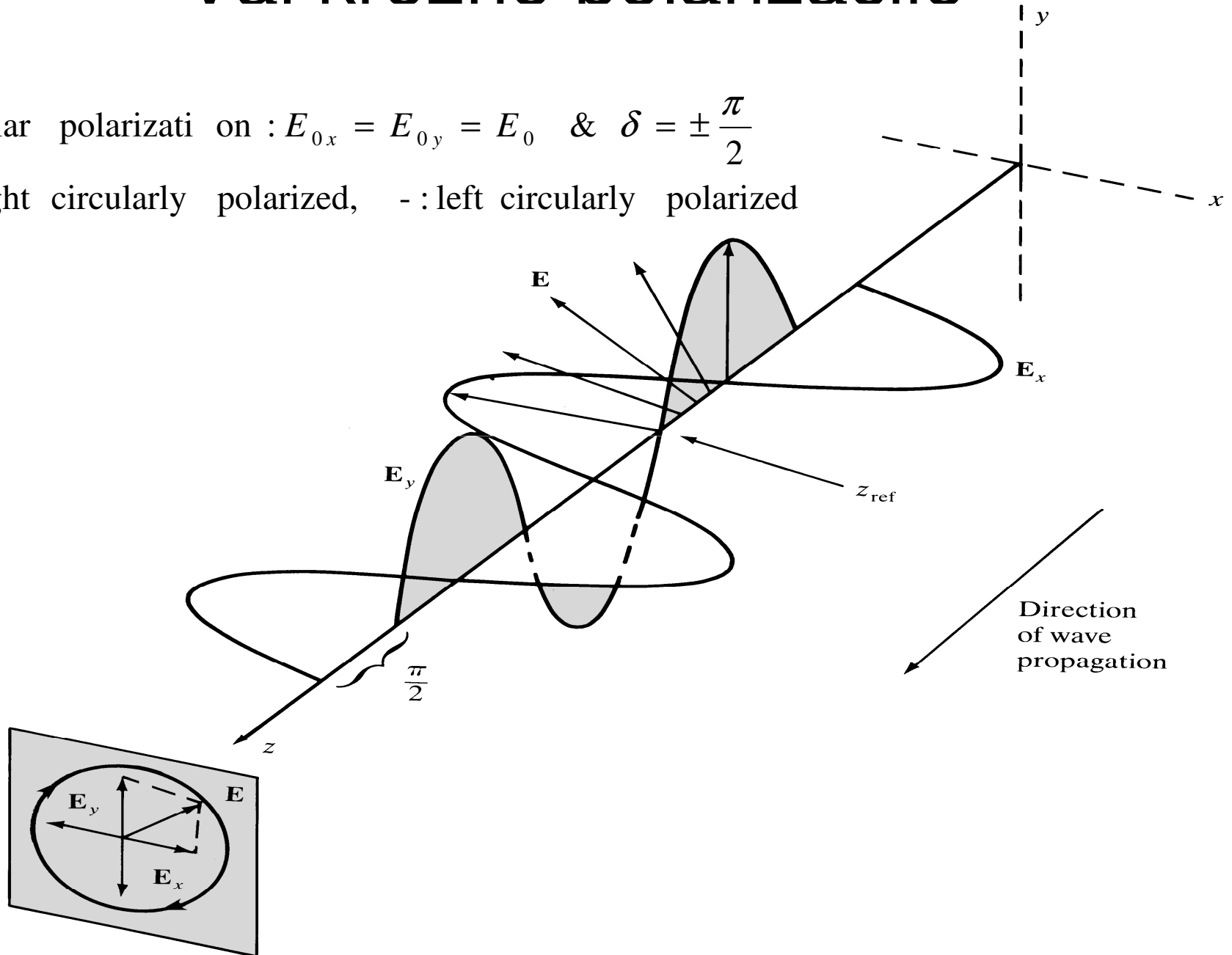
$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}$$

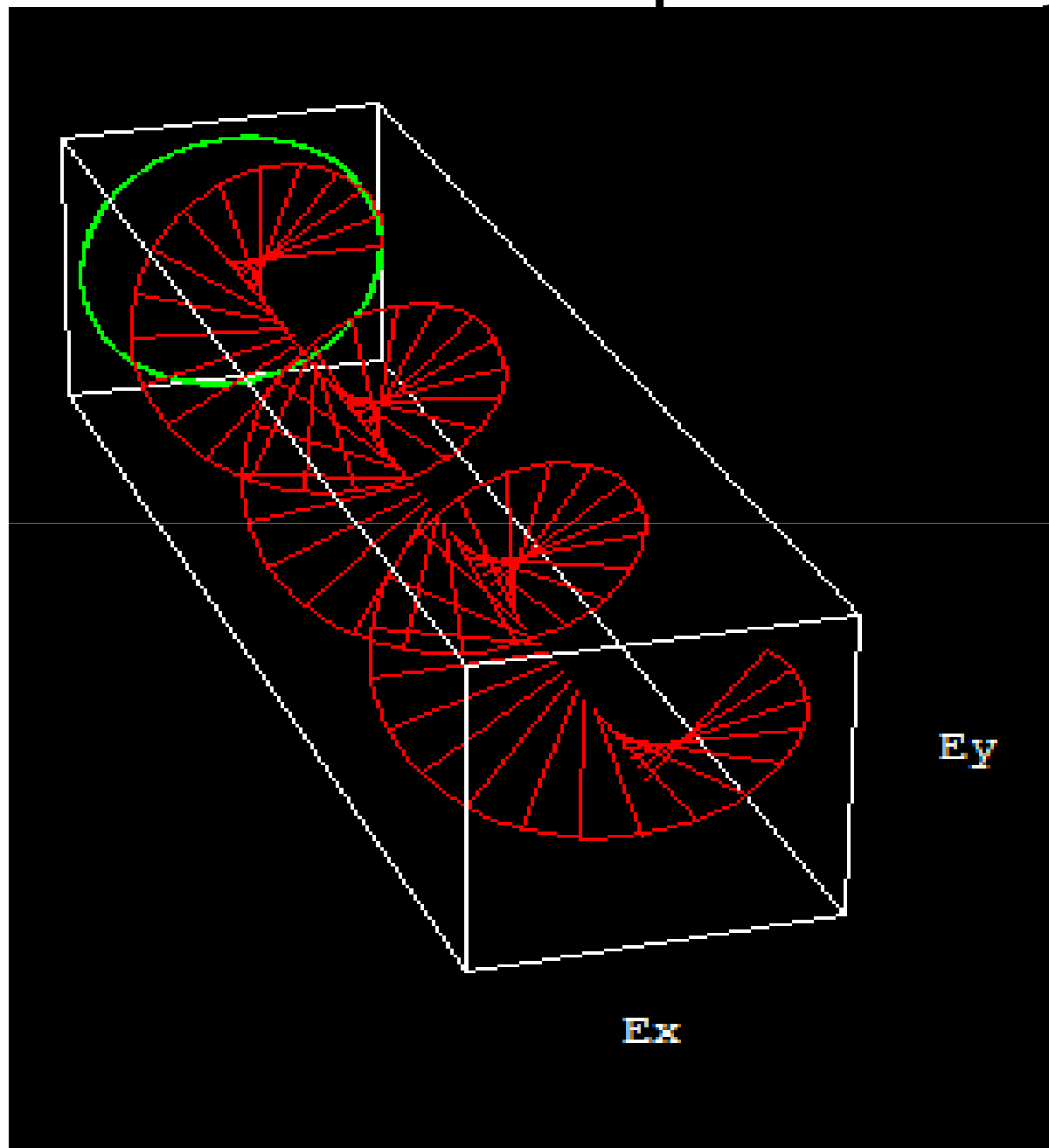
Val krožne polarizácie

Circular polarizati on : $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ & $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$

+ : right circularly polarized, - : left circularly polarized



Ponazoritev krožne polarizacije



Optični vodniki

Svetlovodi

1. Planarni svetlovodi:

- tankoplastni svetlovod
- površinski plazmonski svetlovod

2. Optična kremenova (SiO_2) vlakna:

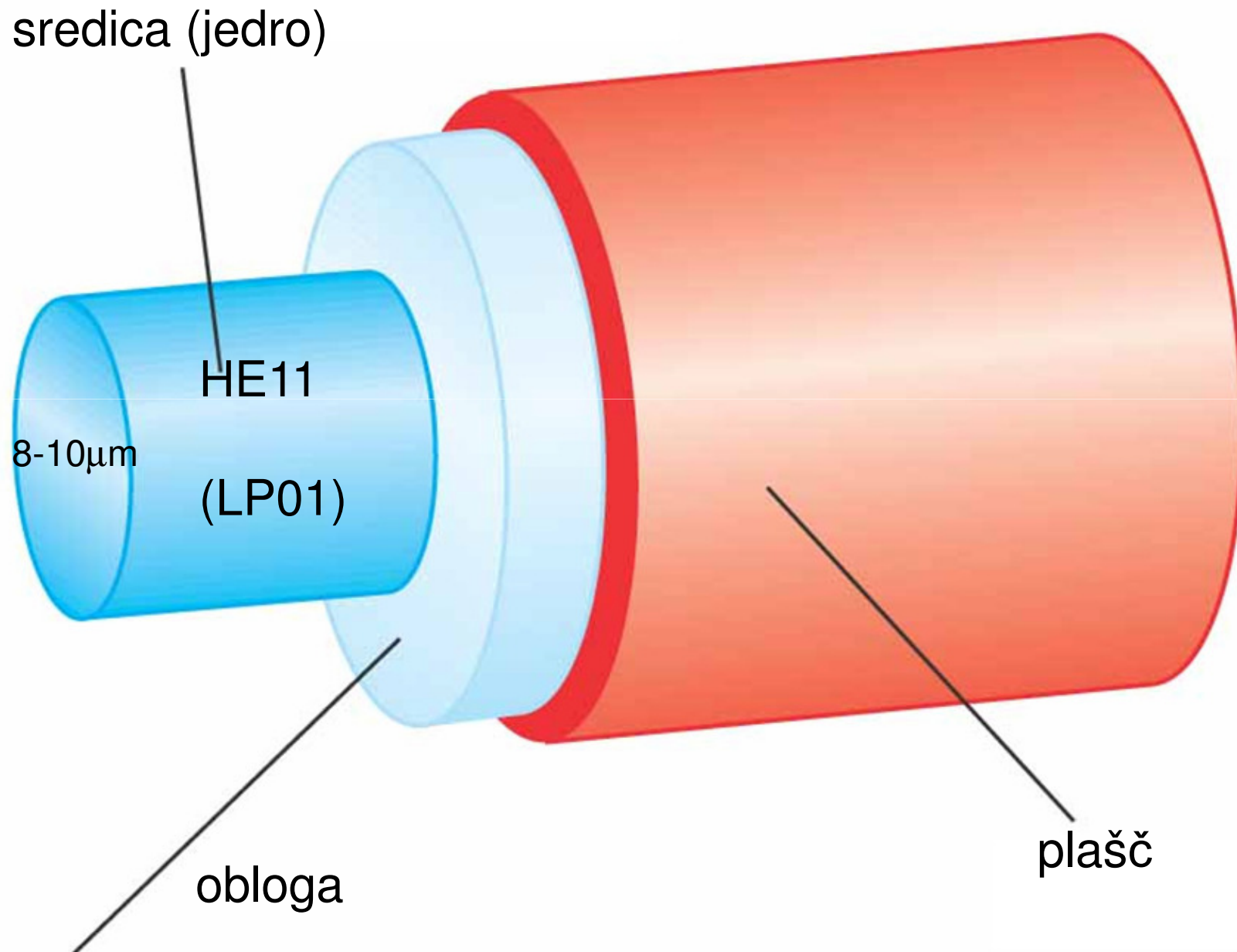
- enorodovno optično vlakno
- mnogorodovno optično vlakno

3. Optična plastična vlakna

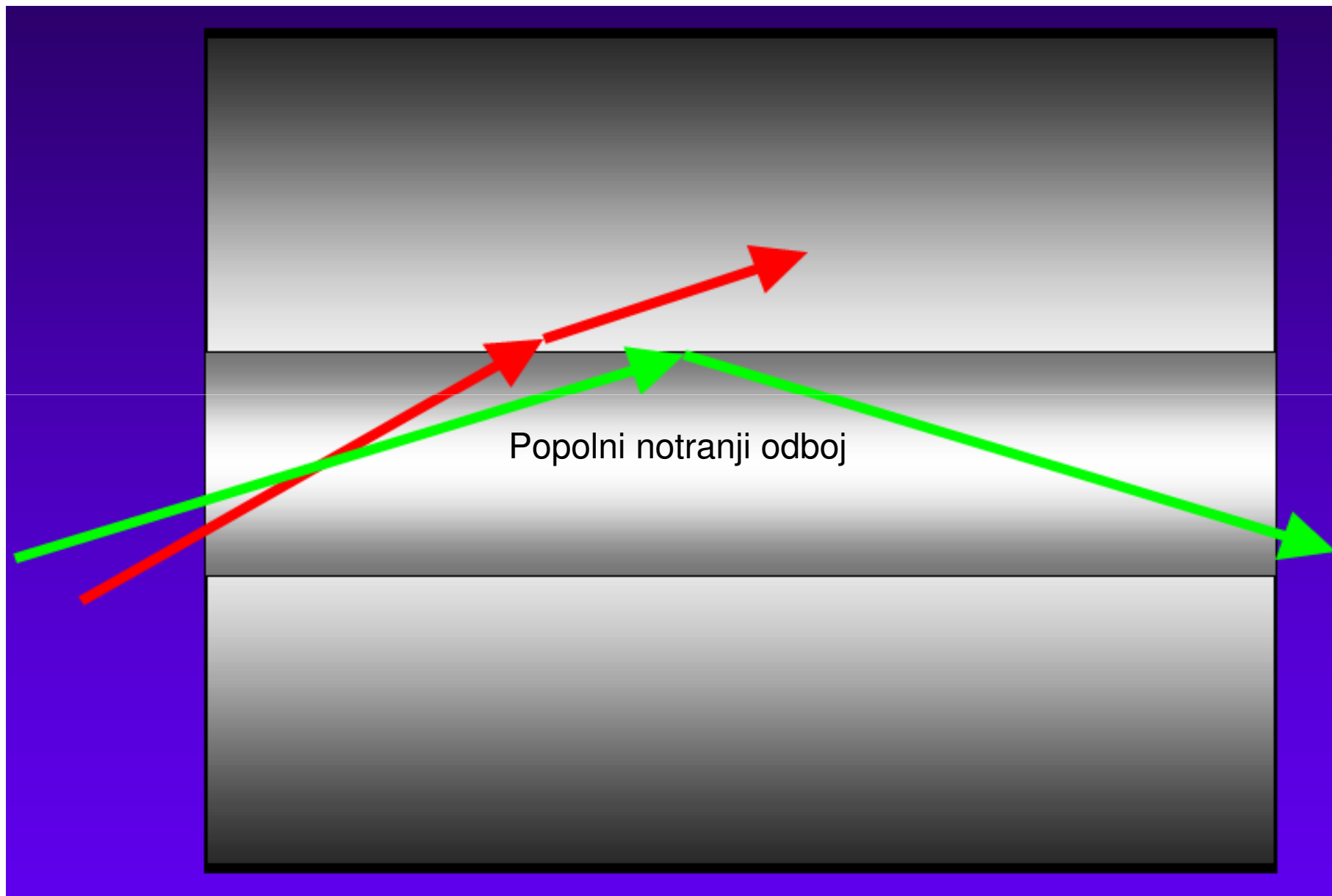
4. Mikrostrukturna vlakna:

- vlakna po principu modificiranega lomnega količnika
- vlakna po principu zaporne periodične strukture (vlakna z zračno sredico)

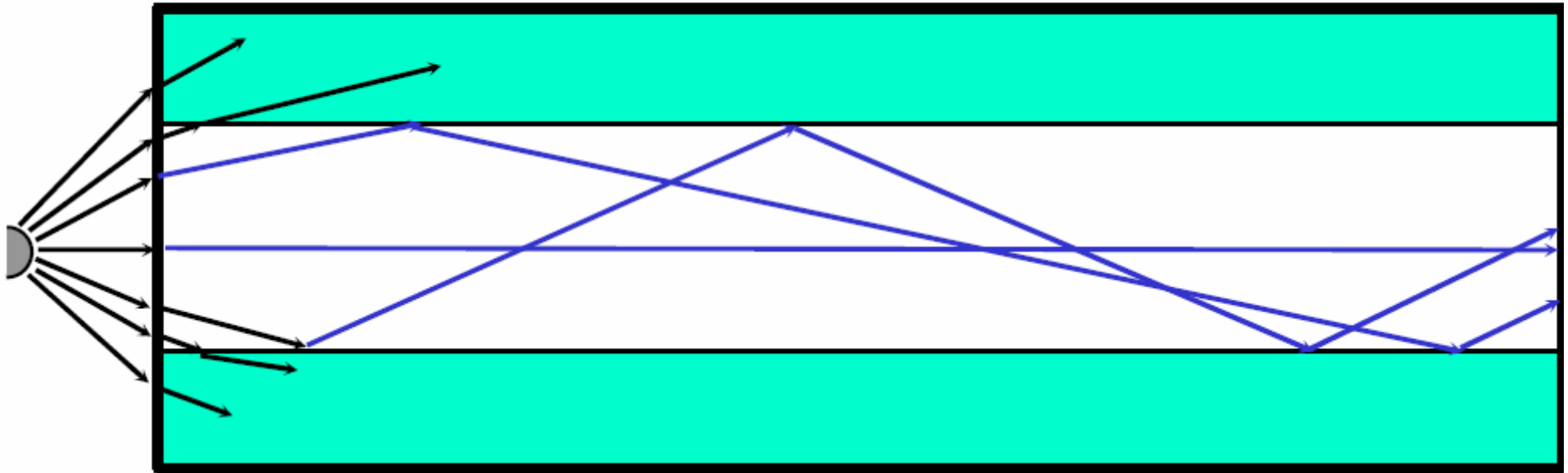
Optično vlakno



Način ujetja svetlobe v sredici



Število rodov



$$M = \left[\frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2} \right]^2$$

2

M = število rodov
 d = premer jedra
 λ = valovna dolžina
 n_1 = količnik sredice
 n_2 = količnik obloge

Sevanje in absorpcija

Sevanje in absorpcija

Sevanje:

Pospešeni naelektreni delci

- izmenični tok

Sevanje ali absorpcija:

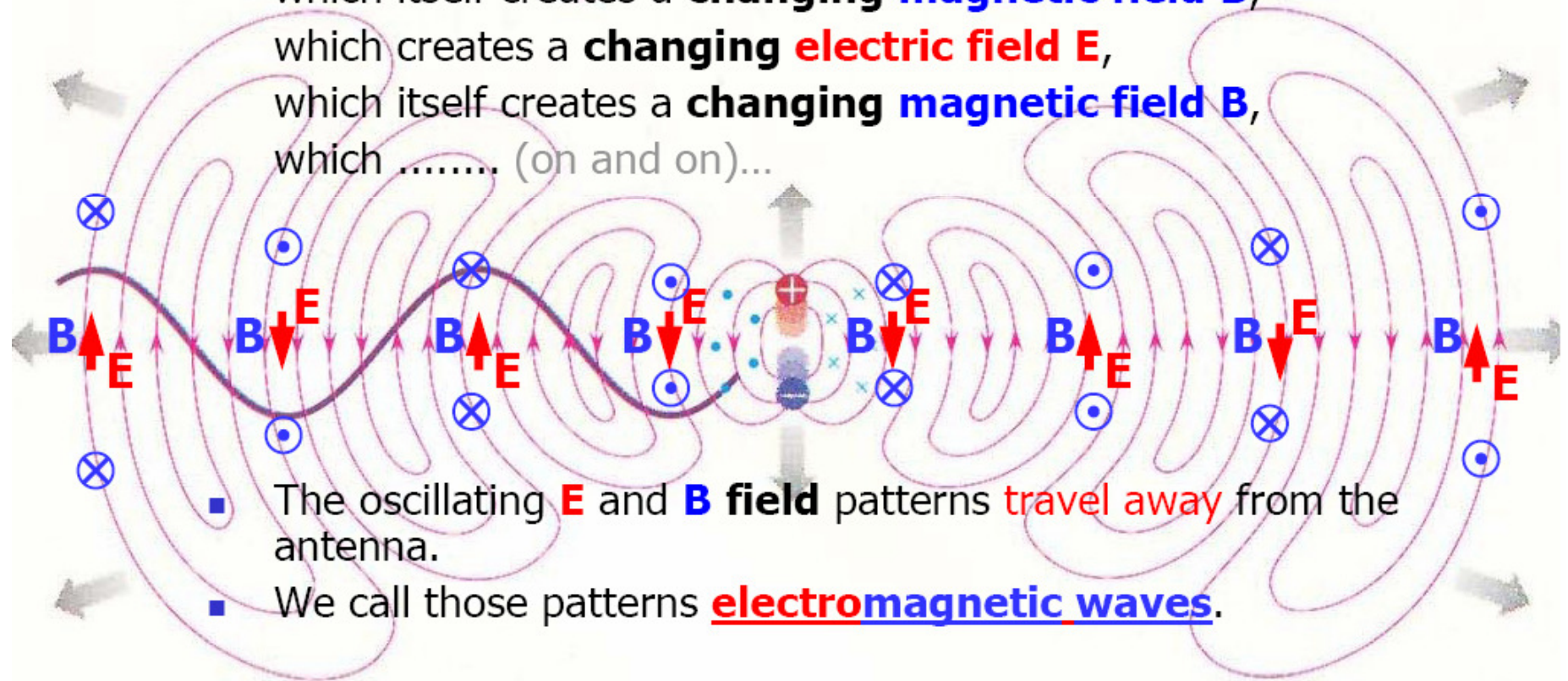
- sprememba energijskega stanja snovi

Sevalni pojavi

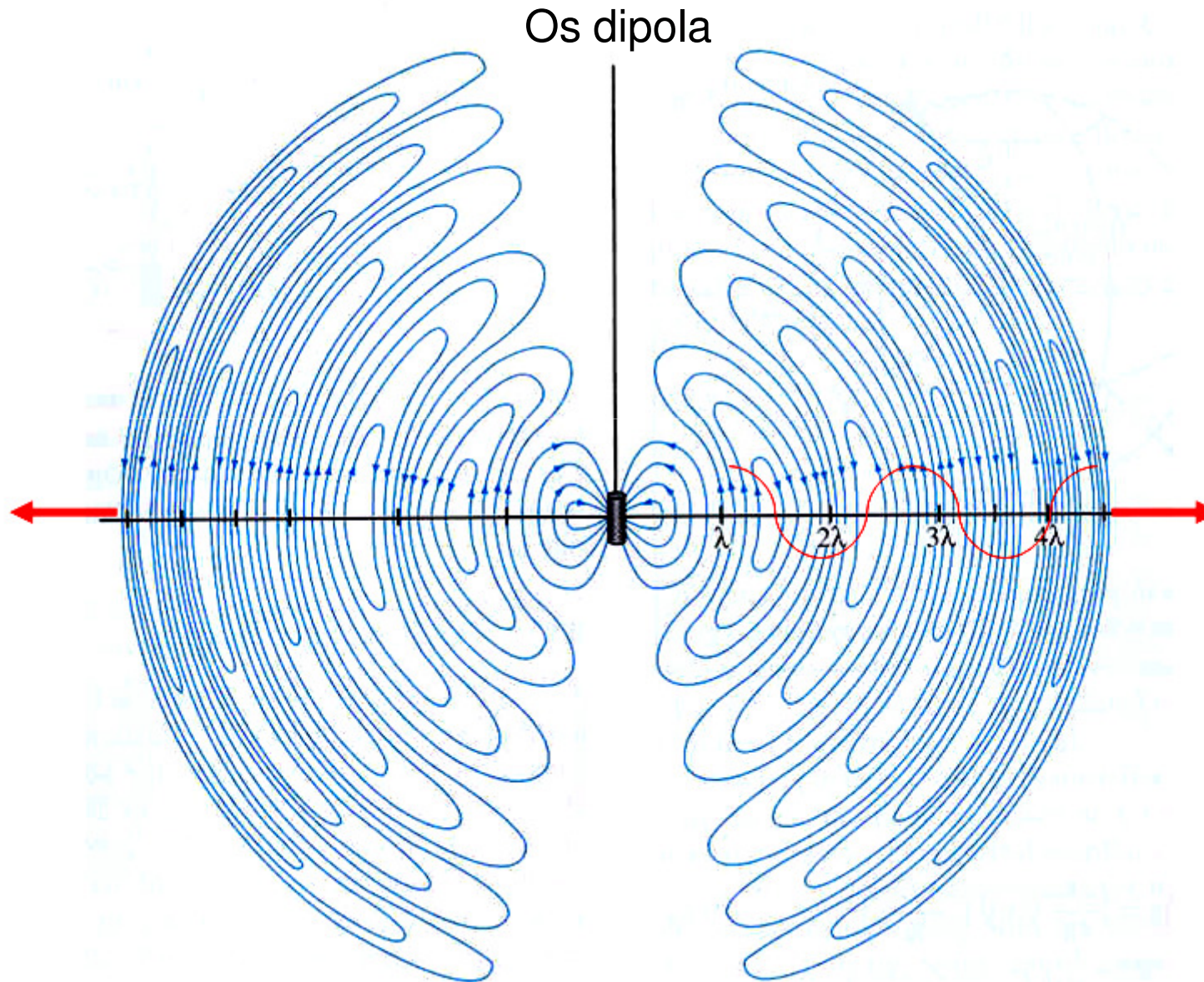
1. Prehod med energijskimi stanji atoma (Bohrov model) - -
Prehod elektronov med stabilnimi oblami (sevanje plinov)
2. Prehod med energijskimi stanji kvantne jame
 - Prehod elektronov med energijskimi nivoji (kvantni kaskadni laser)
3. Prehod med energijskimi stanji snovi polprevodnika
 - Prehod elektronov s prevodnega v valenčni pas (polprevodniški laser)
4. Prehod med energijskimi stanji molekule
 - Vibracijsko - rotacijski energijski pasovi (maser, laser)
 - Primer trdih Roentgenskih žarkov
5. Pospešeno gibanje naelektrenih delcev
 - Enakomerno kroženje
 - Oscilatorno (izmenično) gibanje elektronov – izmenični tok, antena
6. Kombinirano gibanje
 - Sinhrotronsko sevanje

Sevanje dipola

current flows along the rods, and
causes the emission of a **changing electric field E** ,
which itself creates a **changing magnetic field B** ,
which creates a **changing electric field E** ,
which itself creates a **changing magnetic field B** ,
which (on and on)...



Elektromagnetno polje - sevanje



Sevanje elektrona pri preskoku

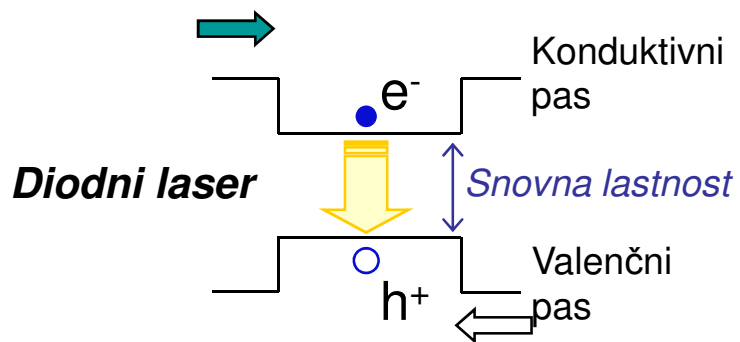


Sevanje elektrona pri zaviranju

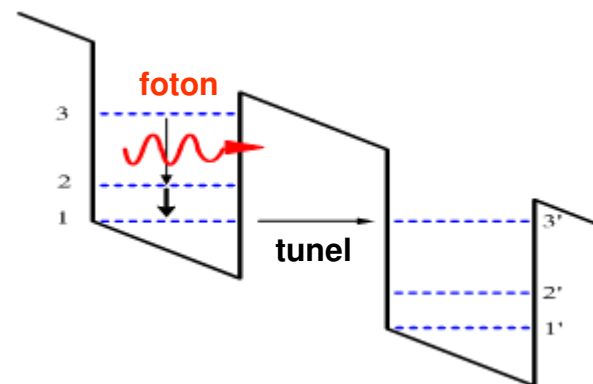


Medpodpasovni prehodi

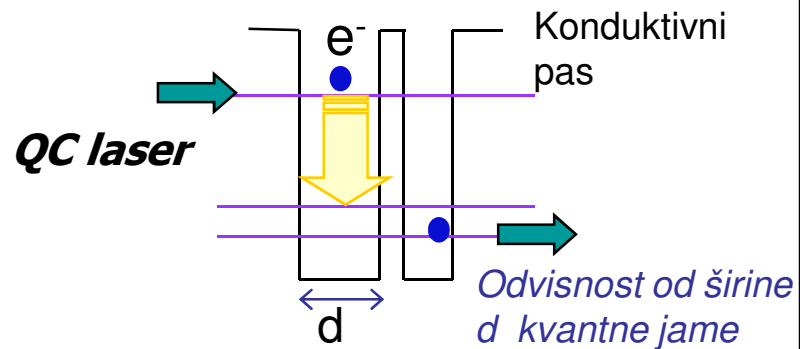
Medpasovni prehod



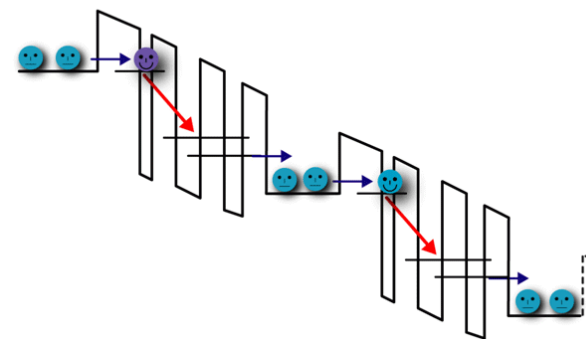
Medpodpasovni prehod v kaskadi



Medpodpasovni prehod



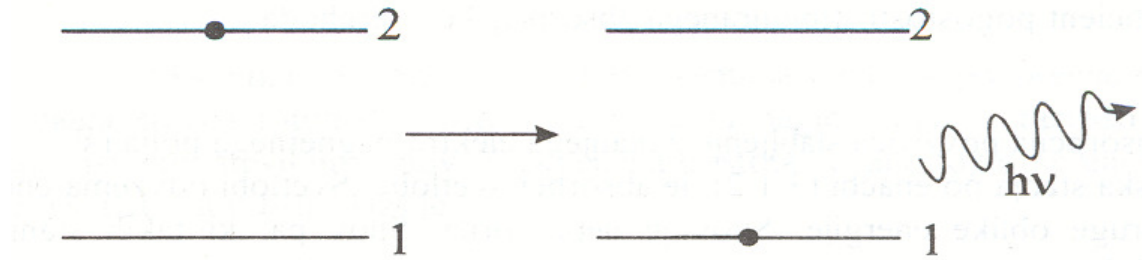
Posamezni elektron generira n fotonov



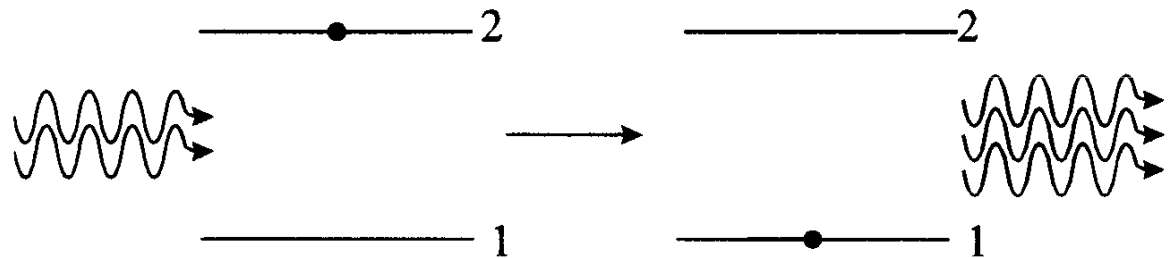
Multiplikativni proces!

Emisija in absorpcija

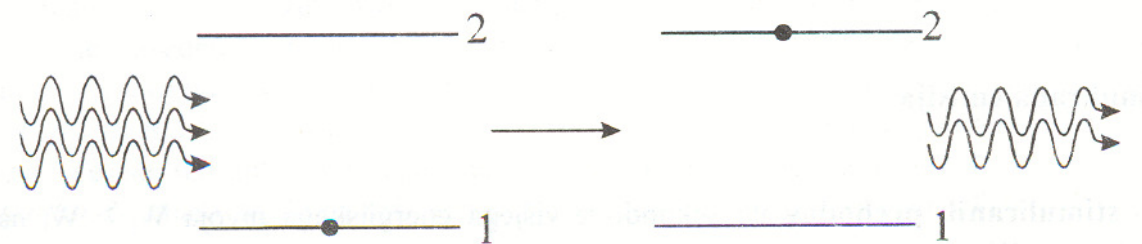
Spontana emisija



Stimulirana emisija



Absorpcija



Absorpcija, spontana in stimulirana emisija

Einsteinovi koeficienti pogostosti spontanih in stimuliranih prehodov (koeficienti absorpcije in emisije)

1. Spontani (samodejni, nevzbujeni) prehodi z j-tega na i-ti energijski nivo ($W_j > W_i$), emisija radiacije, spontano sevanje, nekoherentno polje, šum

$$dN_j/dt = -A_{ji} N_j, \quad N_j \dots \text{naseljenost } j\text{-tega energijskega pasu}$$

2. Stimulirani (vsiljeni, vzbujeni) prehodi med i-tim in j-tim energijskim pasom v obe smeri, stimulirana emisija in absorpcija svetlobnega polja, signal

$$dN_j/dt = -B_{ji} N_j \rho \qquad dN_i/dt = -B_{ij} N_i \rho$$

ρ je prostorninska gostota moči svetlobnega polja, ki vzbuja stimuliran prehod.

Augustin Fresnel

Fresnelove enačbe za odboj
in lom

Fresnelovi kolobarji

Fresnelove cone

Fresnelove aproksimacije



Joseph von Fraunhofer

- spektroskopija
- absorpcijske črte
- elektromagnetno polje
- uklonske mrežice



Pierre de Fermat, Another Mathematician

Fermat was a French mathematician who was given a small amount of credit for calculus.

Once, he was struck by the plague and was reported dead!! Later, this information was corrected and he continued his love for mathematics



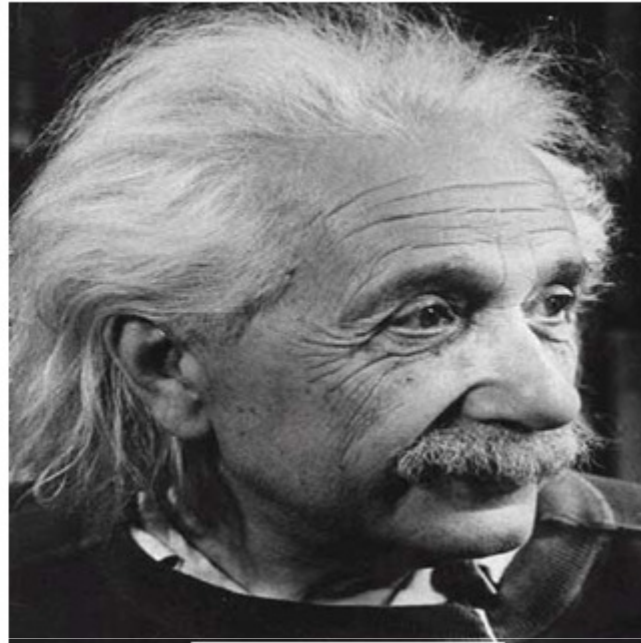
Willebrord van Roijen Snell

- This Swiss Mathematician was also known as Snellius. He was a lawyer, but discovered the sin law and calculated an approximation for π to seven decimal places.

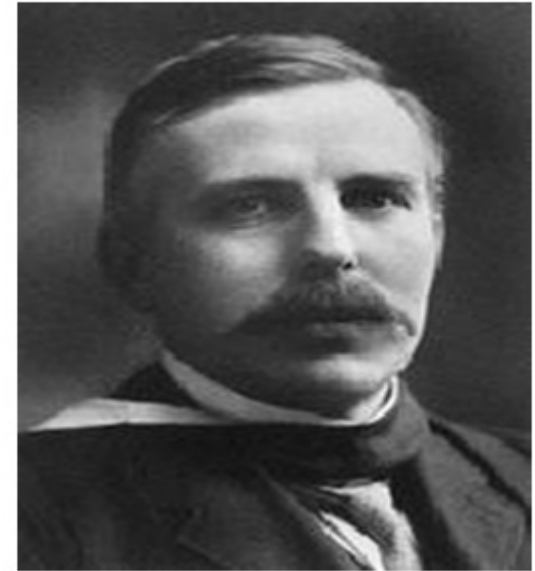




Planck



Einstein



Rutherford



Sklep

- Razumevanje temeljnih svetlobnih pojavov je osnova za obravnavo vlakenske optike.
-

Konec