

Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Razlikovni studiji (910/920/930/940/950)

Fizika 2

Predavanje 7

Energija elektromagnetskog vala. Interakcija
elektromagnetskog zračenja i tvari

Dr. sc. Damir Lelas

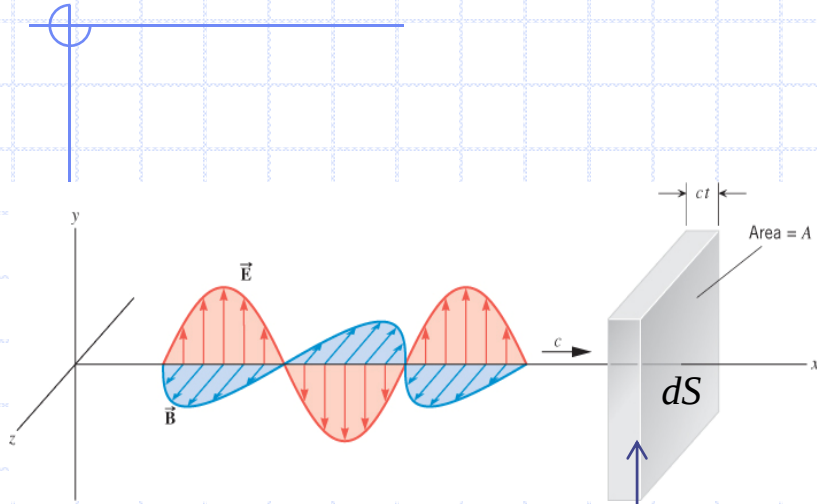
(Damir.Lelas@fesb.hr,

damir.lelas@cern.ch)

Danas ćemo raditi:

- Energija elektromagnetskog vala
- Interakcija elektromagnetskog zračenja i tvari
(V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: “Valovi i optika”, poglavlje 4.9 & 4.10)
 - Disperzija (rasap svjetlosti), apsorpcija
 - Refleksija i lom
 - Fresnelove relacije
 - Polarizacija svjetlosti

Gustoća energije elektromagnetskog vala



Gustoća energije elektromagnetskog vala jednaka je zbroju gustoća energije komponente električnog polja i magnetskog polja elektromagnetskog vala.

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \frac{B^2}{\mu_0^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \frac{E^2}{c^2 \mu_0^2} =$$

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{E^2}{c^2 \mu_0} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{E^2}{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} = \epsilon_0 E^2$$

Energija unutar volumena $dV = S c dt$

$$dE = w \cdot dV = w \cdot dS \cdot c dt$$

$$P = \frac{dE}{dS dt} \left(\frac{J}{m^2 s} \right) = w \cdot c = \epsilon_0 c E^2 = \epsilon_0 c E \mu_0 H c = \underbrace{\epsilon_0 \mu_0 \cdot c^2}_1 \cdot EH = EH$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Gustoća toka energije

Energija elektromagnetskog vala

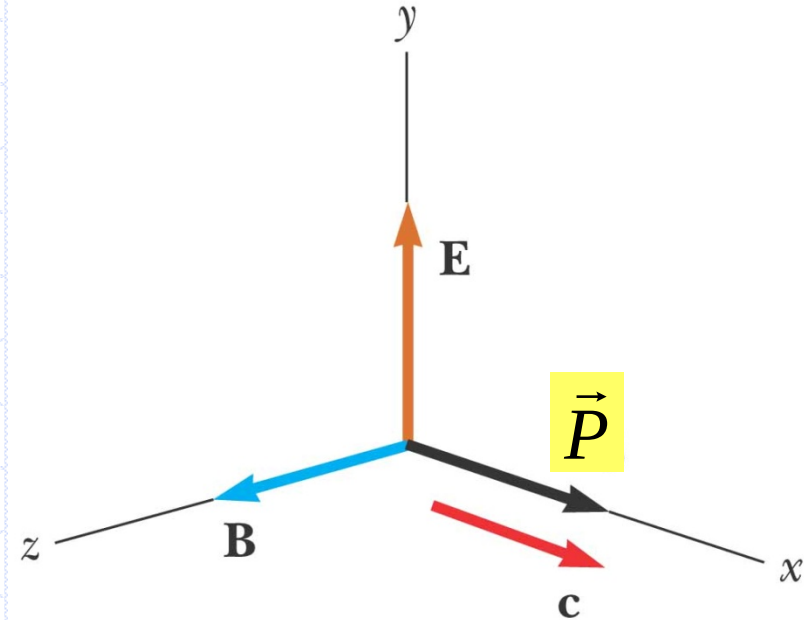
- ❑ Elektromagnetski val **prenosi energiju** kroz prostor.
- ❑ **Gustoća toka energije**, tj. **intenzitet** elektromagnetskog vala, je energija koju ravni elektromagnetski val u jedinici vremena prenese kroz jedinicu površine.
- ❑ Gustoća toka energije je vektorska veličina, a smjer joj je jednak smjeru širenja vala i zove se **Poyntingov vektor**:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{E} \times \vec{B})$$

- ❑ Gustoća toka energije mijenja se s vremenom, a njegova **srednja vrijednost** unutar jednog perioda (**intenzitet**) iznosi:

$$E_0 / H_0 = \sqrt{\mu / \varepsilon} \text{ (...iz predavanja 6)}$$

$$\bar{P} \equiv I = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} H_0^2$$

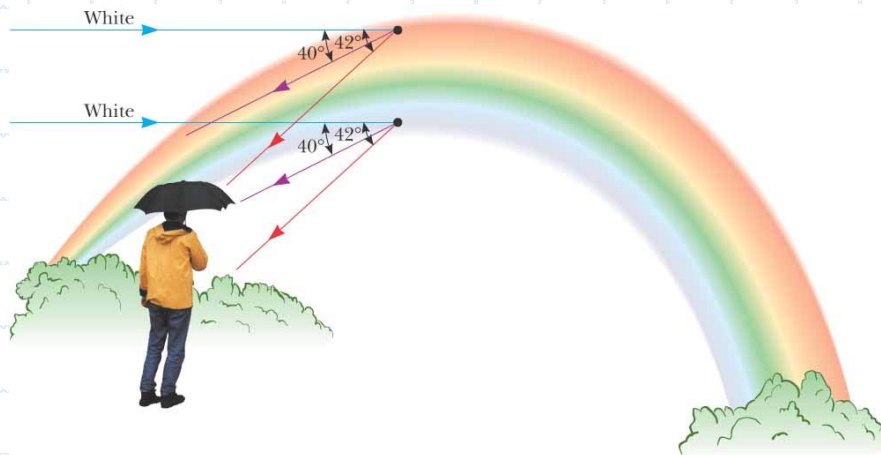
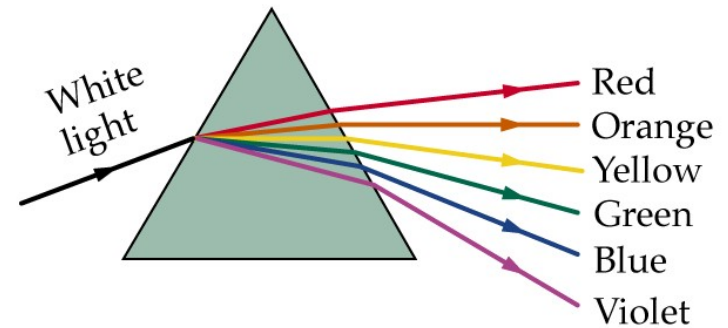


Pitanja za provjeru znanja

- 1. Kako nastaju elektromagnetski valovi? Koja je veza između smjera širenja vala, titranja električnog i magnetskog polja? Koji je izraz za brzinu elektromagnetskih valova? (obavezno)**
- 2. Što je Poyntingov vektor. Kako glasi jednadžba električnog polja (magnetskog) polja ravnog elektromagnetskog vala, a kako sfernog vala?**
3. Nacrtajte električni titrajni krug i objasnite elektromagnetske titraje. Objasnite analogiju između mehaničkih i električnih titrajnih sistema.
4. Kako nastaje elektromagnetski valovi? Koja je veza između smjera širenja vala i titranja električnog i magnetskog polja? Koji je izraz za brzinu elektromagnetskih valova? Pretpostavite smjer širenja vala i smjer titranja električnog polja, te napišite valnu jednadžbu za električno i magnetsko polje i pripadajuća rješenja. Koja je veza između električnog i magnetskog polja u elektromagnetskom valu?
5. Iz Maxwellovih jednadžbi u diferencijalnom obliku izvedite valne jednadžbe za električno i magnetsko polje i nađite njihova rješenja.
6. Izvedite izraz za i gustoću toka energije elektromagnetskog vala (Poyntingov vektor), te za intenzitet elektromagnetskog vala?
7. Opišite spektar elektromagnetskih valova.

Zašto je nebo plavo?

- ❑ Zašto je nebo plavo ?
- ❑ Zašto je nebo na Mjesecu tamno ?
- ❑ Zašto je zalaz Sunca crven ?
- ❑ Kako nastaje duga ?
- ❑ Zašto svjetlo slijedi zakrivljenu putanju u svjetlovodu



Zakon loma i refleksije

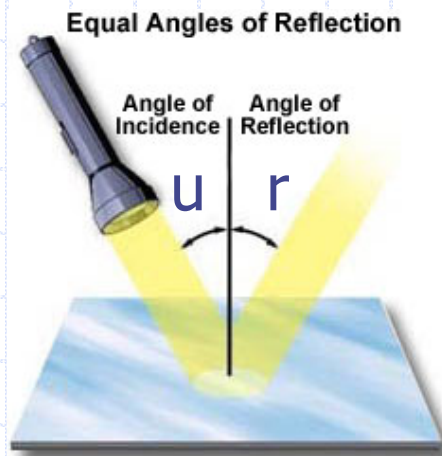
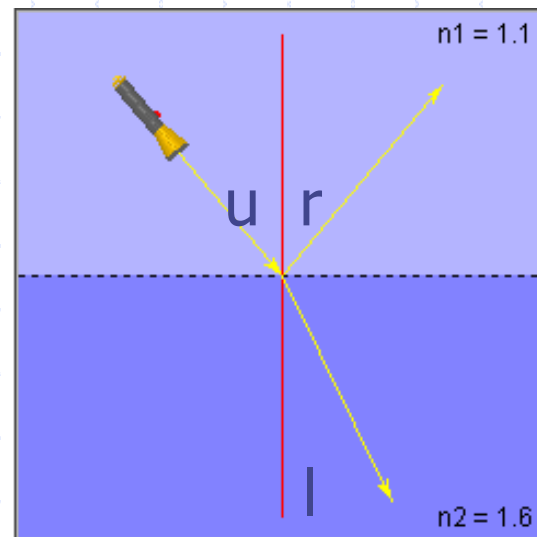


Figure 1



Snellov zakon loma

Zakon refleksije

$$u = r$$

$$\frac{\sin u}{\sin l} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ gdje je indeks loma : } n = \frac{c}{v}$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} = \sqrt{(1 + \chi_e)(1 + \chi_m)}$$

Kod refleksije na optički gušćem sredstvu ($n_2 > n_1$) reflektirani val doživi skok u fazi za π u odnosu na upadni val.

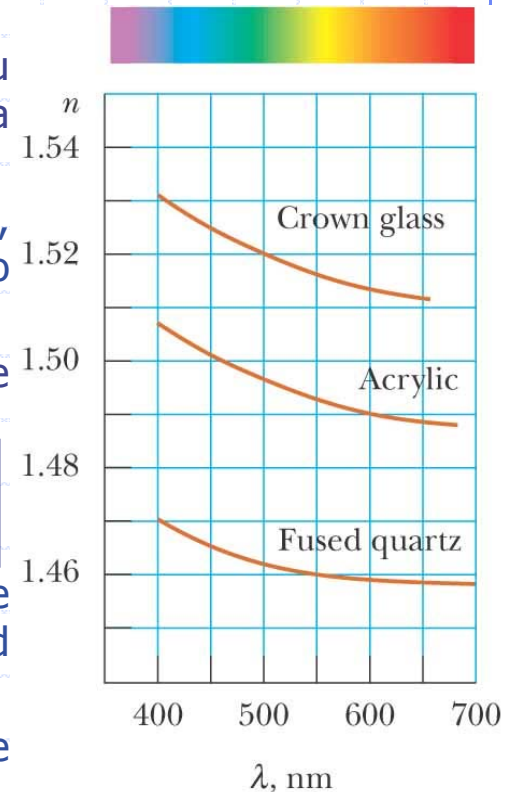
Električna i magnetska susceptibilnost, χ_e i χ_m

Disperzija i apsorpcija (1)

- ❑ Pojava da se sunčeva svjetlost pri prolazu kroz prozirnu prizmu razlaže na zrake različitih boja (najmanje se lomi crvena, a najviše ljubičasta) zove se **disperzija ili rasap svjetlosti**.
- ❑ Uzrok pojavi disperzije ili rasapa je ovisnost indeksa loma, odnosno brzine širenja svjetlosti, o valnoj duljini, odnosno frekvenciji svjetlosti **$n=f(\omega)$** .
- ❑ Empirijski utvrđena vrijednost za vidljivi dio spektra može se opisati Cauchyevom formulom:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}; \text{ A i B konstante karakteristne za pojedini materijal}$$

- ❑ Rasap svjetlosti se može razumijeti polazeći od činjenice da se tvar sastoji od atoma, tj. pozitivnih i negativnih naboja koji kad se nađu u elektromagnetskom polju titraju.
- ❑ Utjecaj elektromagnetskog vala na gibanje jezgre se može zanemariti jer je jezgra znatno teža u usporedbi s elektronom.
- ❑ **Gibanje elektrona pod utjecajem elektromagnetskog vala se može predložiti modelom prisilnog harmonijskog titranja s prigušenjem:**
- ❑ ω_0 – vlastita frekvencija titranja elektrona, γ -konstanta prigušenja,
- ❑ $E_0 e^{i\omega t}$ - električno polje na mjestu gdje se nalazi elektron.

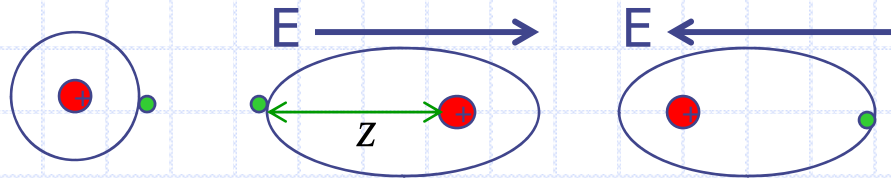


$$\ddot{z} + \omega_0^2 z + \gamma \dot{z} = e E_0 e^{i\omega t}$$

Disperzija i apsorpcija (2)

- Rješenje jednadžbe prisilnog harmonijskog titranja s prigušenjem:

$$z(t) = \frac{e}{m} \frac{E_o e^{i\omega t}}{(\omega_o^2 - \omega^2 + i\gamma\omega)}$$



- Zbog gibanja elektrona inducira se električni dipolni moment (težišta pozitivnog i negativnog naboja se ne podudaraju), $p=qz$ (z-udaljenost pozitivnog i negativnog naboja).
- Ukupni dipolni moment u jedinici volumena tvari tj. vektor električne polarizacije $\vec{P} = N\vec{p}$, N - broj elementarnih dipola u jedinici volumena.
- **Električna polarizacija** ili električni dipolni moment po jedinici volumena se može izraziti i kao (relacija iz elektrostatičke):

$$\vec{P} = \epsilon_o \chi_e \vec{E}$$

Disperzija i apsorpcija (3)

- Indeks loma - makroskopsko svojstvo tvari se može izraziti preko mikroskopske veličine kao što je električna polarizacija P :

- za prozirne tvari $\chi_m \approx 0$, pa je indeks loma :

$$n \approx \sqrt{1 + \chi_e} = \sqrt{1 + \frac{P}{\epsilon_o E}} = \sqrt{1 + \frac{Nez}{\epsilon_o E}}$$

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m \epsilon_o (\omega_o^2 - \omega^2 + i \gamma \omega)}$$

- Indeks loma je kompleksna funkcija frekvencije elektromagnetskog vala:

$$n(\omega) \approx 1 + \frac{1}{2} N \frac{e^2}{m \epsilon_o} \frac{1}{\omega_o^2 - \omega^2 + i \gamma \omega} = n'(\omega) - i n''(\omega)$$

Ovi izrazi vrijedi samo za jednoatomne plinove i simetrično građene molekule.

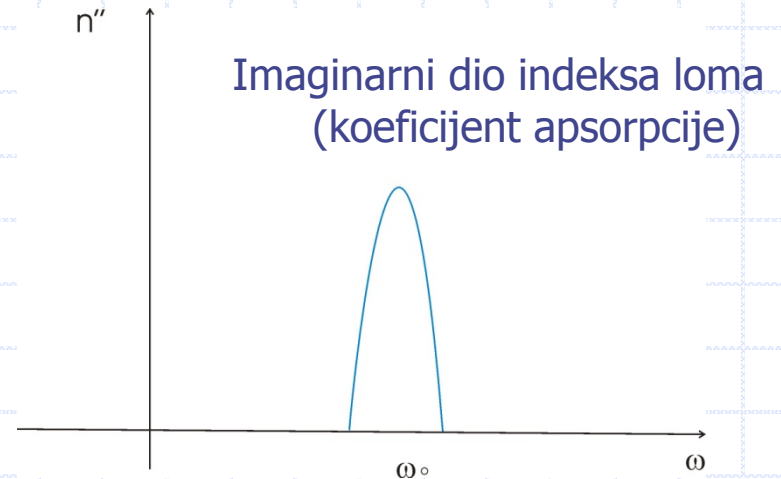
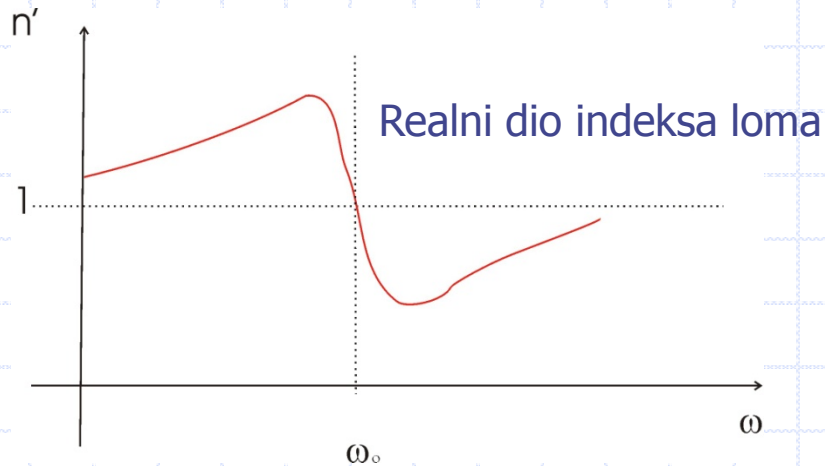
indeks loma:

$$n' = 1 + \frac{Ne^2}{2\epsilon_o m} \frac{\omega_o^2 - \omega^2}{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

koeficijent apsorpcije:

$$n'' = \frac{Ne^2}{2\epsilon_o m} \frac{\gamma \omega}{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}$$

Disperzija i apsorpcija (4)



- Općenito indeks loma se povećava porastom frekvencije (osim u uskom području oko vlastite frekvencije elektrona), to je pojava disperzije.
- Odstupanje od ovog pravila u području oko vlastite frekvencije elektrona ω_0 , kad indeks loma opada s porastom frekvencije, zove se **anomalna disperzija**.
- Koeficijent apsorpcije $n''(\omega)$ ima izraziti maksimum oko frekvencije ω_0 , dok se za sve ostale frekvencije može zanemariti.
- U području anomalne disperzije kad je frekvencija elektromagnetskog vala ω vrlo blizu vlastitoj frekvenciji elektrona ω_0 , indeks loma je $n' \sim 1$, a n'' koeficijent apsorpcije je velik.

$$E = E_0 e^{i(\omega t - kz)} = E_0 e^{i\omega(t - nz/c)} = E_0 e^{-(\omega/c)zn''} e^{i\omega(t - n'z/c)}$$

Disperzija i apsorpcija (5)

- ❑ Koeficijent prigušenja γ je vrlo malen, pa kad je frekvencija upadnog vala ω različita od vlastite frekvencije ω_0 opravdano je uzeti $\gamma=0$, te je indeks loma u tom slučaju dan izrazom:

$$n' = 1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

- ❑ Zrak apsorbira svjetlost u ultraljubičastom dijelu spektra, vlastita frekvencija titranja elektrona u zraku je $f_0 = 1,6 \times 10^{15}$ Hz ($\lambda_0 = 186$ nm).
- ❑ Frekvencija svjetlosti je manja od vlastite frekvencije titranja elektrona u zraku ($\omega^2 < \omega_0^2$), indeks loma za svjetlost u zraku je:

$$n' = 1 + \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2} = 1,0004$$

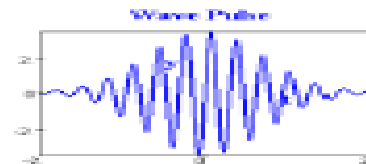
slaganju s eksperimentalno izmjerenim indeksom loma za zrak koji iznosi 1,0003.

- ❑ Kad je ($\omega^2 \gg \omega_0^2$) indeks loma je: $n' = 1 - \frac{Ne^2}{2\varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega^2}$ ovo je ispunjeno za elektromagnetske valove visokih frekvencija, kao što su rendgenske zrake, čiji je indeks loma manji od 1. Za rendgenske zrake tvari su optički rjeđe od vakuuma.
- ❑ U sredstvima s velikim brojem slobodnih elektrona (metali, ionosfera), $\omega_0 = 0$, te je indeks loma manji od 1 za sve frekvencije.
- ❑ Za niže frekvencije ($\omega^2 < Ne^2 / m\varepsilon_0$), indeks loma je čisti imaginarni broj, pa valovi niskih frekvencija (dugi i srednji valovi) ne mogu proći kroz metal ili ionosferu.
- ❑ Naprotiv, valovi visokih frekvencija ($\omega \gg \omega_0 = 0$) lako prolaze kroz metale i ionosferu, indeks loma ~ 1 , a koeficijent apsorpcije je jednak nuli ($n'' = 0$).

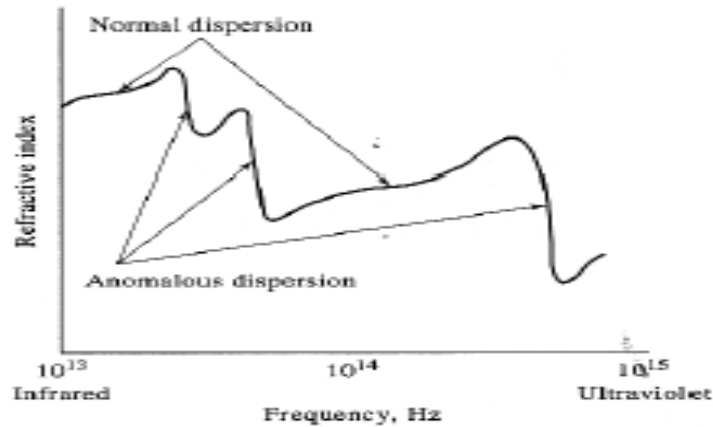
Disperzija, fazna i grupna brzina

- ❑ Fazna brzina v_f je brzina kojom se prostorom širi određena faza vala (npr. maksimum): $v_f = c/n$, za $n < 1$ je $v_f > c$, a c je najveća moguća brzina?
- ❑ Da je $v_f > c$ možemo objasniti razlikom fazne i grupne brzine, fazna brzina je matematički pojam i nije fizikalna veličina koja se daje mjeriti.
- ❑ U disperzivnim sredinama fazna brzina ovisi o valnoj duljini, jer indeks loma ovisi o valnoj duljini, $n = f(\lambda)$, $v_f = f(\lambda)$. $v_f = \omega/k$
- ❑ U prirodi nema idealnog monokromatskog vala, tj. elektromagnetskog vala točno određene frekvencije.
- ❑ U načelu uvijek se i najbolji snop monokromatske svjetlosti sastoji od velikog broja ravnih valova, čije se frekvencije neznatno razlikuju od srednje frekvencije te grupe valova.
- ❑ Svaki val ima malo drugačiju faznu brzinu u disperzivnom sredstvu, pa se ta grupa valova širi kroz prostor grupnom brzinom v_g .
- ❑ Grupna brzina je fizikalna veličina, to je brzina kojom se širi energija ili informacija kroz prostor, a dana je relacijom (može se pokazati da je grupna brzina uvijek manja od c , bez obzira na indeks loma):

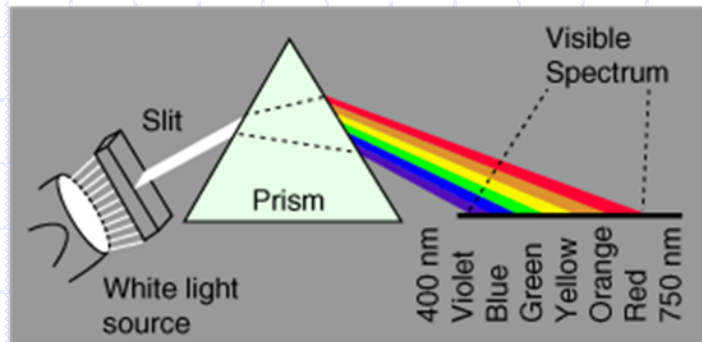
$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda}$$



Primjeri disperzije

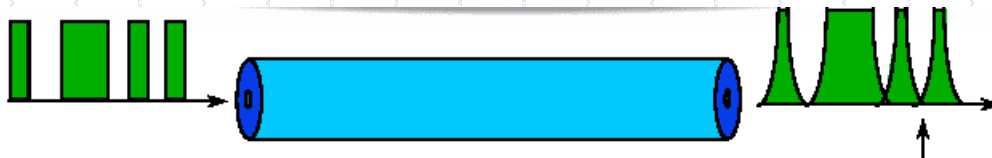


U pravilu postoji više vlastitih frekvencija elektrona u tvarima.



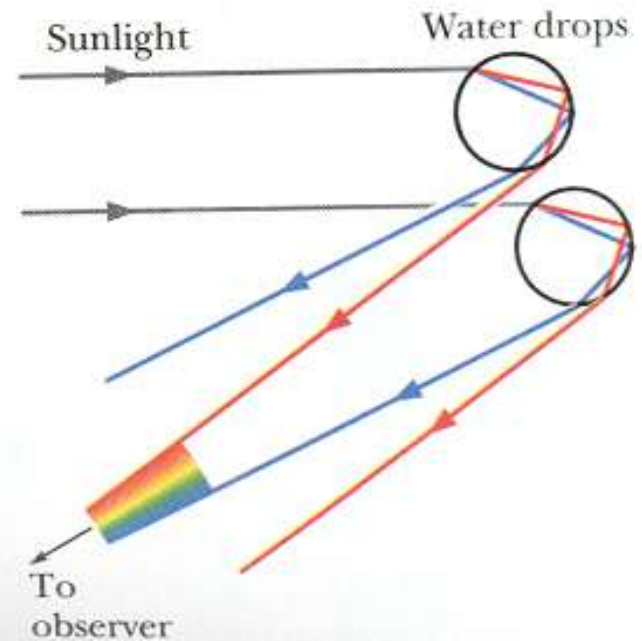
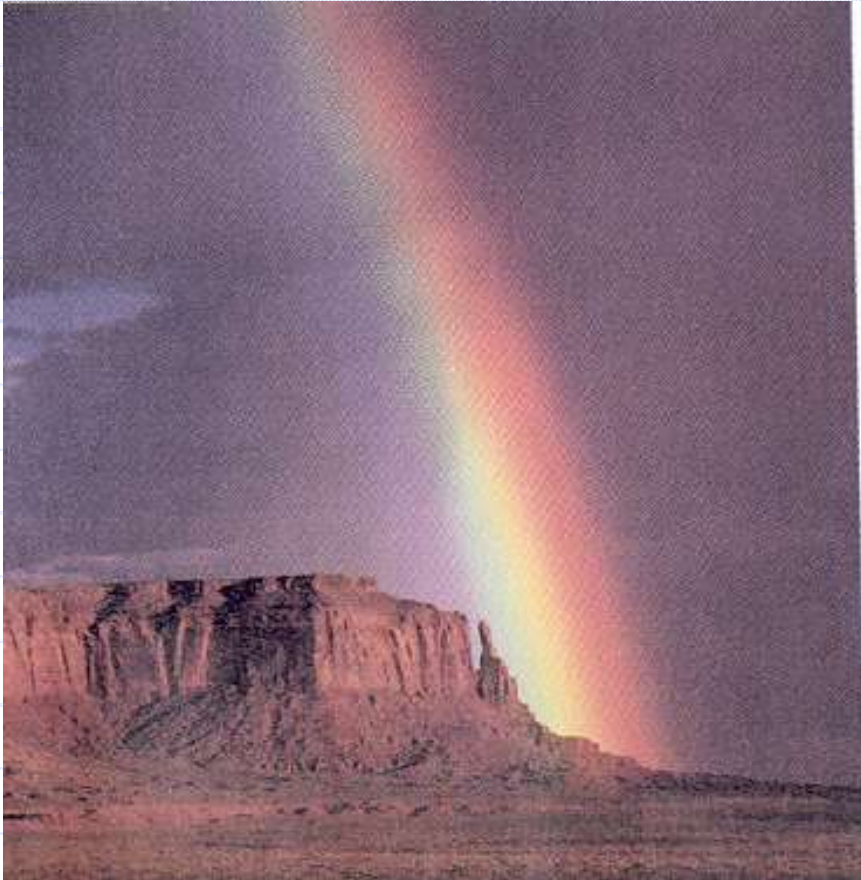
Primjer disperzije: Rasap svjetlosti na staklenoj prizmi.

Indeks loma raste s frekvencijom pa se plava boja ogiba više od crvene.



Zbog disperzije u svjetlovodu (valovi različitih frekvencija imaju različite brzine) dolazi do preklapanja pulseva koji nose informaciju !

Disperzija ili rasap svjetlosti, duga



Refleksija i lom elektromagnetskih valova (1)

- ❑ Valne zrake upadnog reflektiranog i transmitiranog (lomnog) vala leže u istoj ravnini.
- ❑ Frekvencija se pri lomu i refleksiji ne mijenja.
- ❑ Zakon refleksije: Kut upada jednak je kutu refleksije:

$$u = r \quad (u - \text{kut upada}, r - \text{kut refleksije})$$

- ❑ Snellov zakon loma:

$$n_1 \sin u = n_2 \sin l \quad \frac{\sin u}{\sin l} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} = n \quad n = \frac{n_2}{n_1} - \text{relativni indeks loma, indeks loma } n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

- ❑ Za optički prozirna sredstva, $\mu_r = 1$, pa je relativni indeks loma:

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

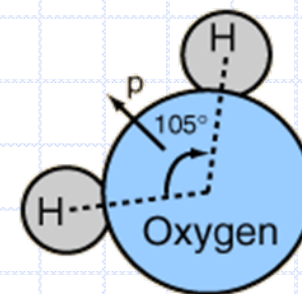
Refleksija i lom elektromagnetskih valova (2)

- ❑ Usporedba eksperimentalno određenih indeksa loma i izračunatih iz poznavanja dielektrične konstante slažu se za jednoatomne plinove i simetrično građene molekule.
- ❑ Odstupanje od relacije $n = \sqrt{\epsilon_r}$ opaža se za tvari koje imaju permanentne električne dipole, npr. molekule vode imaju permanentni električni dipol:

$$\epsilon_r = 81 \quad \sqrt{\epsilon_r} = 9 \quad , \text{ a izmjereni indeks loma vode je } n = 1.33$$

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_o \vec{E} + \epsilon_o \chi_r \vec{E} = \epsilon_o \epsilon_r \vec{E}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 + \chi_e} \quad \chi_e - \text{elektricitna susceptibilnost}$$



Fresnelove jednadžbe za refleksiju i lom (1)

- ❑ Na granicu dvaju sredstava jedan dio elektromagnetskog vala se reflektira, a jedan dio se prenosi u drugo sredstvo.
- ❑ Intenzitet reflektiranog i transmitiranog vala ovisi ne samo o kutu upada i kutu loma, već i o tome titra li električno polje okomito ili paralelno s upadnom ravninom.
- ❑ Augustin Fresnel (1788-1827), prvi je našao izraze iz kojih se može izračunati koliki je omjer amplituda električnog polja reflektiranog i transmitiranog vala u odnosu na upadni val.
- ❑ Zakoni refleksije i transmisije mogu se izvesti i iz graničnih uvjeta koji proizlaze iz Maxwellovih jednadžbi.
- ❑ **Granični uvjeti za električno i magnetsko polje:**

$$D_{n2} - D_{n1} = \sigma - \text{površinska gustoca naboja}$$

$$H_{t2} - H_{t1} = i - \text{površinska gustoca struje}$$

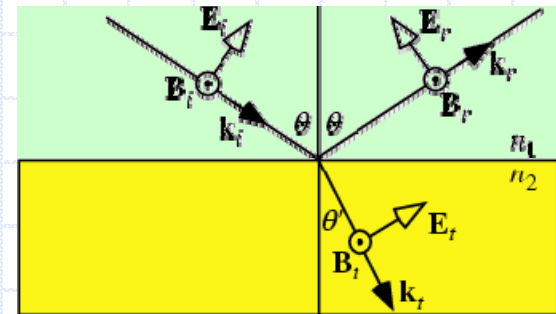
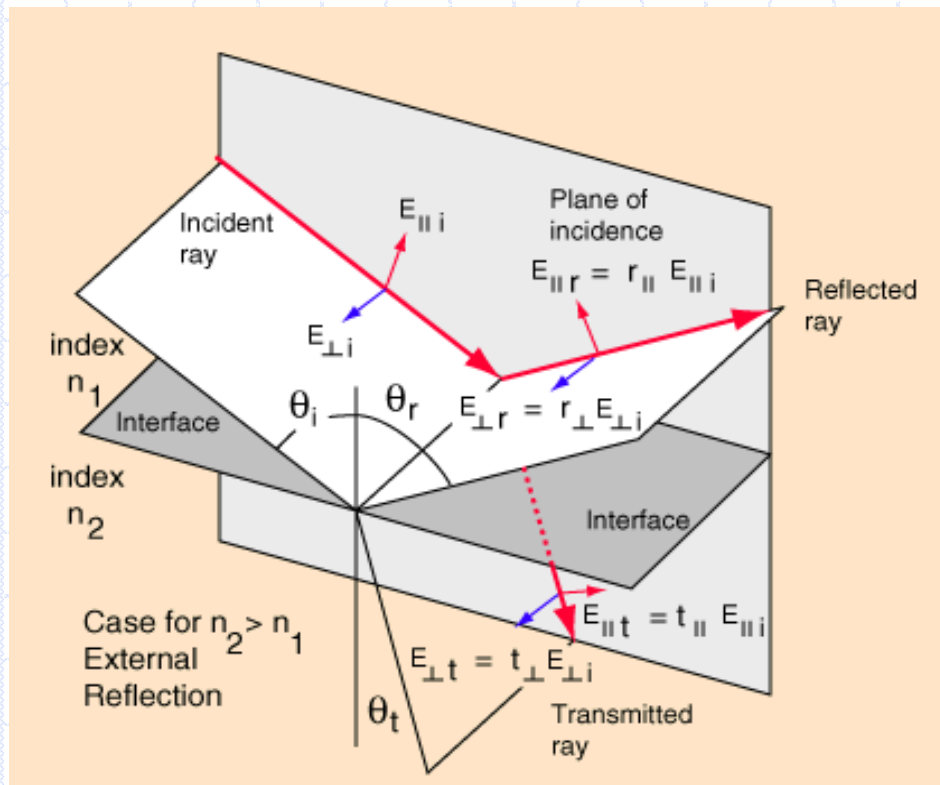
$$B_{n2} = B_{n1}$$

$$E_{t2} = E_{t1}$$

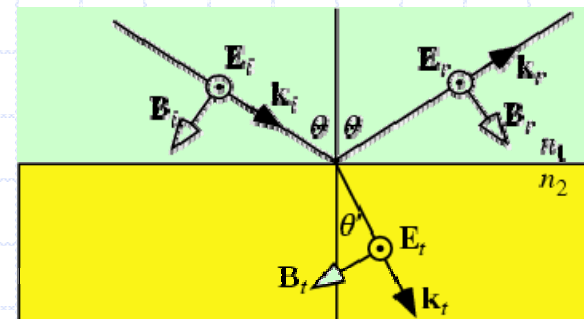
- ❑ D_n i B_n – komponente polja okomite na graničnu površinu, H_t i E_t – komponente paralelne s graničnom površinom
- ❑ Električno i magnetsko polje mogu titrati paralelno s upadnom ravninom i okomito na upadnu ravninu.

Fresnelove jednadžbe za refleksiju i lom (2)

- Električno i magnetsko polje može titrati istovremeno paralelno i okomito na upadnu ravninu.



Električno polje titra paralelno s upadnom ravninom



Električno polje titra okomito na upadnu ravninu

Fresnelove jednadžbe za refleksiju i lom (3)

- ❑ Električno polje titra okomito na upadnu ravninu (**u-kut upada**, **r-kut refleksije**, **l-kut loma**):

$$R_{\perp} = \frac{I_r}{I_u} = \frac{\sin^2(u - l)}{\sin^2(u + l)}$$

Koeficijent refleksije

$$T_{\perp} = \frac{I_t}{I_u} = \frac{4 \sin^2 l \cos^2 l}{\sin^2(u + l)}$$

Koeficijent transmisije

- ❑ Električno polje titra paralelno s upadnom ravninom (**u-kut upada**, **r-kut refleksije**, **l-kut loma**):

$$R_{\parallel} = \frac{I_r}{I_u} = \frac{\operatorname{tg}^2(u - l)}{\operatorname{tg}^2(u + l)}$$

Koeficijent refleksije

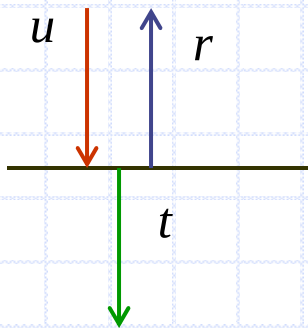
$$T_{\parallel} = \frac{I_t}{I_u} = \frac{4 \sin^2 l \cos^2 u}{\sin^2(u + l) \cos^2(u - l)}$$

Koeficijent transmisije

- ❑ Kad se val širi iz optički rjeđeg u optički gušće ($n_2 > n_1$) sredstvo, na granici dvaju sredstava reflektirani val ima skok u fazi za π u odnosu na upadni val.

Fresnelove relacije kad val upada okomito na graničnu ravninu ($u=0^\circ$)

- Pri okomitom upadu elektromagnetskog vala, faktor refleksije i transmisije poprimaju jednostavnije oblike:



$$E_u + E_r = E_t \quad H_u + H_r = H_t$$

$$I_u = I_r + I_t$$

$$E_u H_u = E_r H_r + E_t H_t$$

$$E_u \frac{B_u}{\mu} = E_r \frac{B_r}{\mu} + E_t \frac{B_r}{\mu}$$

$$\frac{E_u^2 n_1}{c} = \frac{E_r^2 n_1}{c} + \frac{E_t^2 n_2}{c} \left| \cdot \frac{c}{n_1} \right.$$

$$E_u^2 = E_r^2 + n E_t^2 \quad n \equiv n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$E_r = E_u - E_t$$

$$\text{iz } E_0 / H_0 = \sqrt{\mu / \varepsilon} \text{ i } n = \sqrt{\varepsilon_r} \Rightarrow$$

$$n = \frac{n_2}{n_1} - \text{relativni indeks loma}$$

$$E_u^2 = E_u^2 + E_t^2 - 2E_u E_t + n \cdot E_t^2$$

$$2E_u = (1 + n) \cdot E_t$$

$$E_t = \frac{2}{n + 1} E_u$$

$$E_r = \frac{n - 1}{n + 1} E_u$$

$$R = \left(\frac{E_r}{E_u} \right)^2 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

$$T = \frac{4n}{(n + 1)^2}$$

$$R + T = 1$$

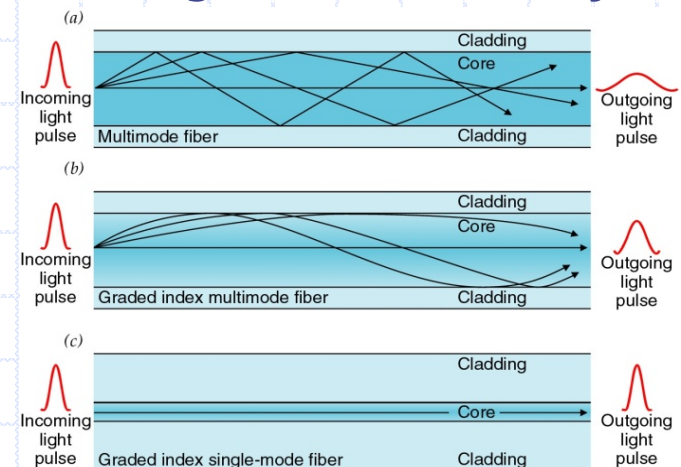
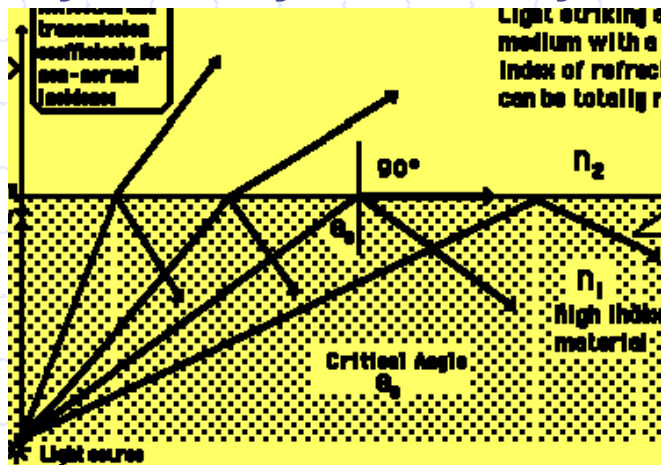
Totalna refleksija – Svjetlovodi

- Totalna refleksija se javlja kad je kut upada veći od kritičnog kuta:

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

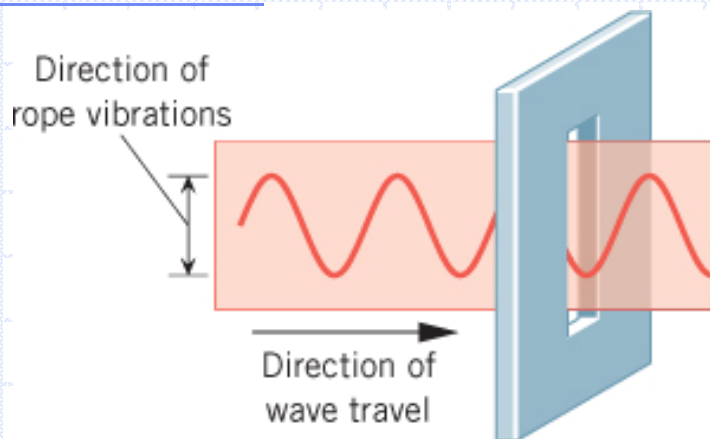


- Očito, totalna refleksija se javlja samo kad je $n_1 > n_2$, tj. kad se svjetlo širi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, npr. staklo-zrak, voda-zrak.
- Svjetlo u svjetlovodu slijedi oblik svjetlovoda zbog totalne refleksije:



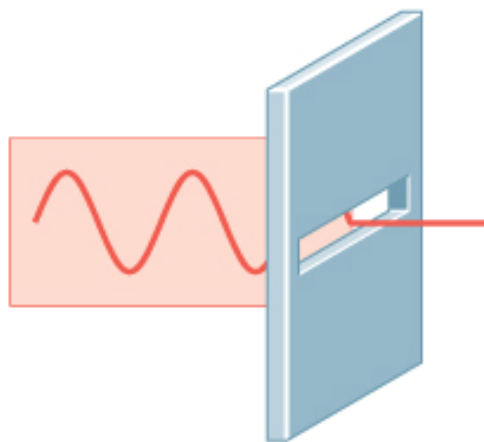
$$\sin \theta_c = \frac{n_{\text{zrak}}}{n_{\text{staklo}}} = \frac{1}{1.52} = 0.658 \rightarrow \theta_c = 41,1^\circ$$

Polarizacija transverzalnog mehaničkog vala



(a)

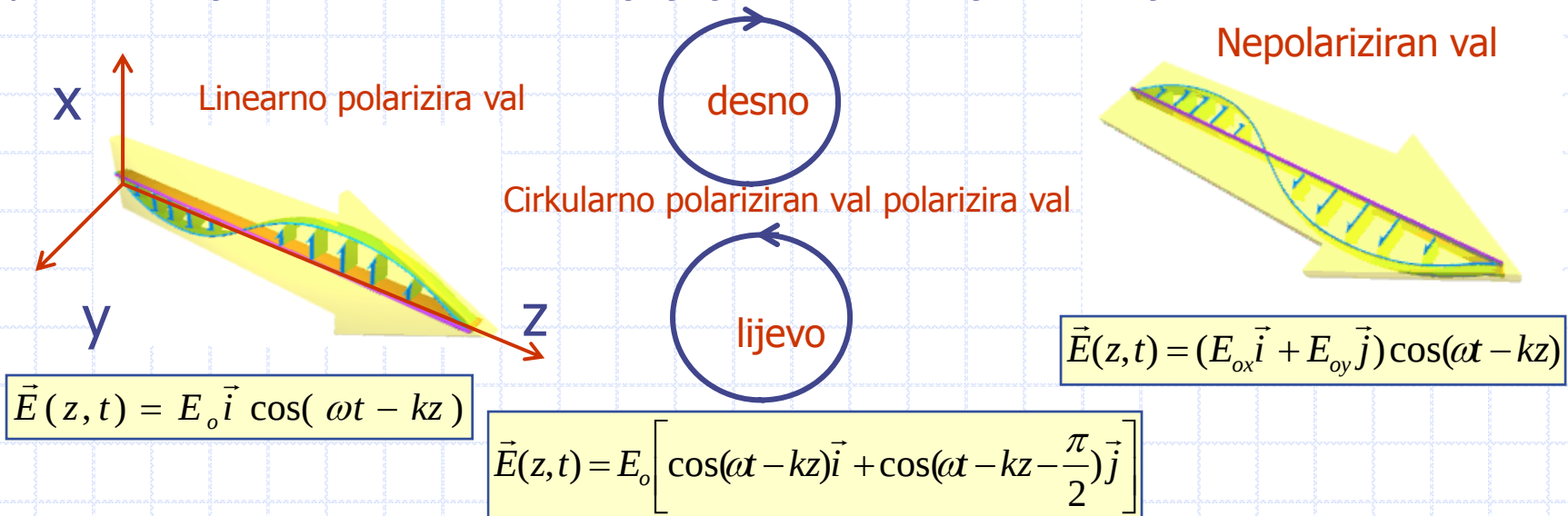
Linearno polarizirani
mehanički val



(b)

Polarizacija (1)

- Polarizacija je svojstvo svih transverzalnih valova pa tako i elektromagnetskog vala.
- U načelu val može biti polariziran i nepolariziran.
- Stanje polarizacije defnira se pravcem duž kojeg titra vektor električnog polja.
- Ako vektor električnog polja titra uvijek duž istog pravca (koji je naravno okomit na smjer širenja vala), val je linearno polariziran.
- Ako se smjer pravca duž kojeg titra vektor električnog polja mijenja od trenutka do trenutka, onda se kaže da je val nepolariziran, nema istaknutog pravca duž kojeg titra vektor električnog polja.
- Kod cirkularno polariziranog vala vektor električnog polja rotira u ravnini okomitoj na pravac širenja kutnom brzinom ω koja je jednaka kružnoj frekvenciji vala.



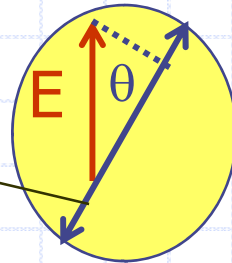
Polarizacija (2)

- ◆ Zanimljivo objašnjenje polarizacije može se naći na:
 - <http://www.colorado.edu/physics/2000/polarization/index.html>
- Prirodno svjetlo koje dolazi iz uobičajenih izvora je nepolarizirno.
- Ono nastaje emisijom ogromnog broja valova iz pobuđenih atoma (žarulja, plinska svjetiljka, ...) koji su slučajno orijentirani, tako da nema ni istaknutog pravca duž kojeg titra električno polje.
- Polarizirano svjetlo se može dobiti na više načina:
 - **polarizatori – polarizacija selektivnom apsorpcijom**
 - **polarizacija refleksijom (Brewsterov kut)**
 - **polarizacija raspršenjem**
 - **polarizacija prolazom svjetlosti kroz kristale dvolomce (dvoosne)**

Polarizator

- Polarizator je tvar koja propušta električno polje koje titra samo duž određenog pravca i tako od nepolariziranog svjetla, nakon prolaska kroz polarizator nastaje, linearano polarizirano svjetlo.

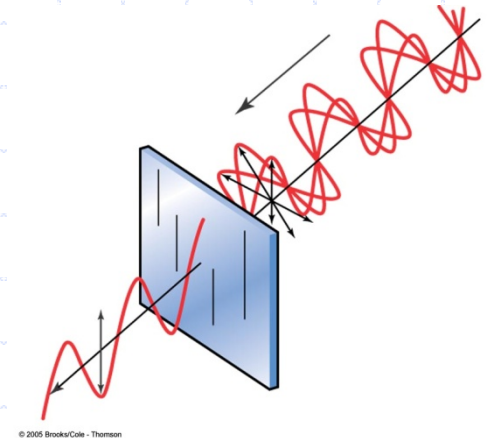
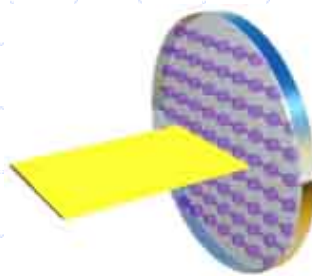
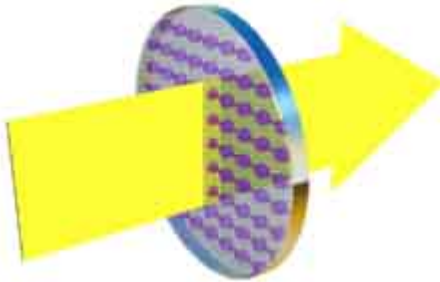
Os propuštanja polarizatora



θ -kut između vektora električnog polja i osi propuštanja polarizatora

Malusov zakon:

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



Dikroični polarizator- kristal dvolomac koji 100% apsorbira jednu komponentu, a 100% propušta drugu komponentu.

Polarizacija refleksijom

- ❑ Kad se nepolarizirano svjetlo reflektira na granici dvaju sredstava, reflektirano svjetlo može biti potpuno ili djelomično polarizirano ovisno o kutu upada.
- ❑ Kad je kut upada jednak **Brewsterovom kutu**, reflektirani val je u potpunosti polariziran (linearno polarizirani val) i to tako da vektor električnog polja titra okomito na ravninu upadanja.
- ❑ Eksperimentom je uočeno, a slijedi i iz Fresnelovih relacija, da potpuna polarizacija nastupa u slučaju kad je $u+l=90^\circ$, tada se paralelna komponenta električnog polja uopće ne reflektira.
- ❑ Polarizacija refleksijom – Brewsterov kut:
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/polarizedlight/brewster/index.html>

Koeficijent refleksije za komponentu električnog polja paralelnu s upadnom ravninom (vidi Fresnelove relacije strana 18.):

$$R_{\parallel} = \frac{I_r}{I_u} = \frac{\operatorname{tg}^2(u-l)}{\operatorname{tg}^2(u+l)}$$

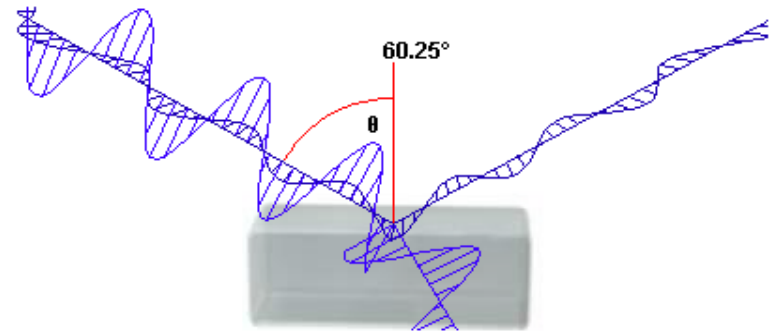
kad je $u+l=90^\circ$



$$R_{\parallel} = 0$$

$$\operatorname{tg} u_b = \frac{n_2}{n_1}$$

Brewsterov kut



1.75
Refractive Index

426 nm
Wavelength

View Angle

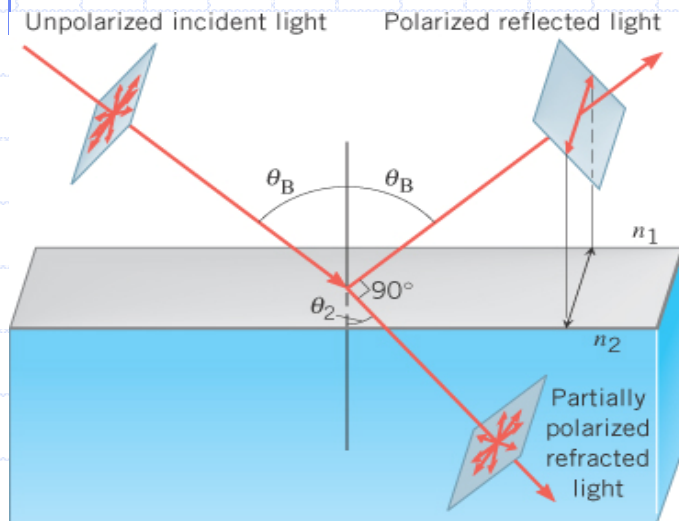
Brewster's Angle (θ) = $\operatorname{ArcTan}(\text{Refractive Index})$

$$\theta = 60.25^\circ = \operatorname{ArcTan}(1.75)$$

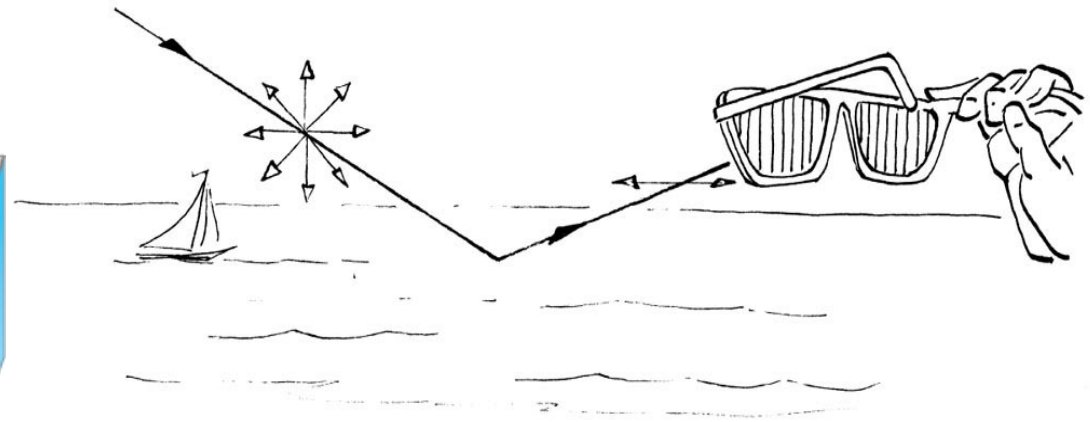
Polarizacija refleksijom

- Da bi se smanjio intenzitet svjetla, staklo kvalitetnih sunčanih naočala ima polarizator koji guši komponentu električnog polja koja titra okomito na upadnu ravninu u svjetlu koje se reflektira od površine mora.

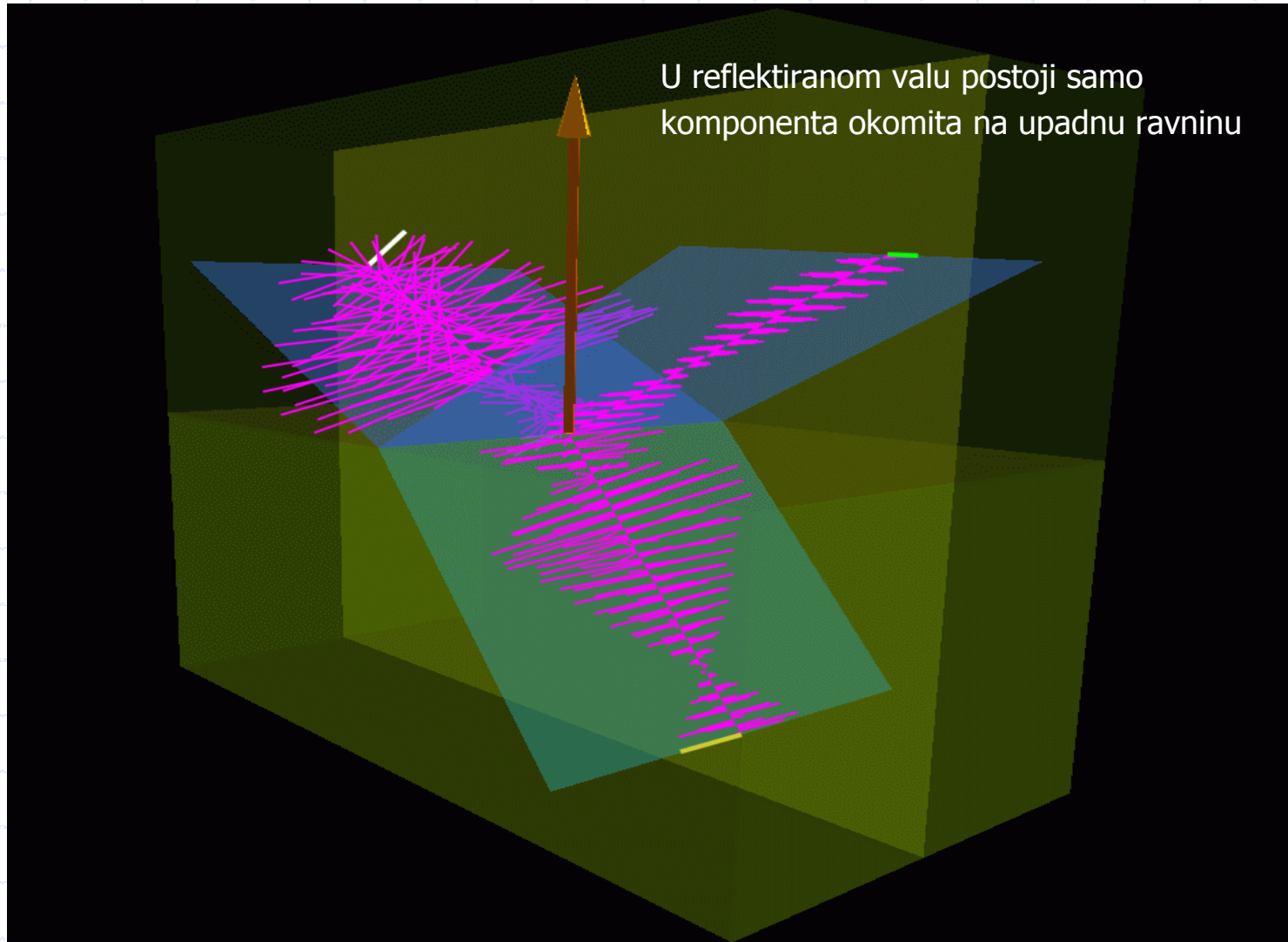
$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$



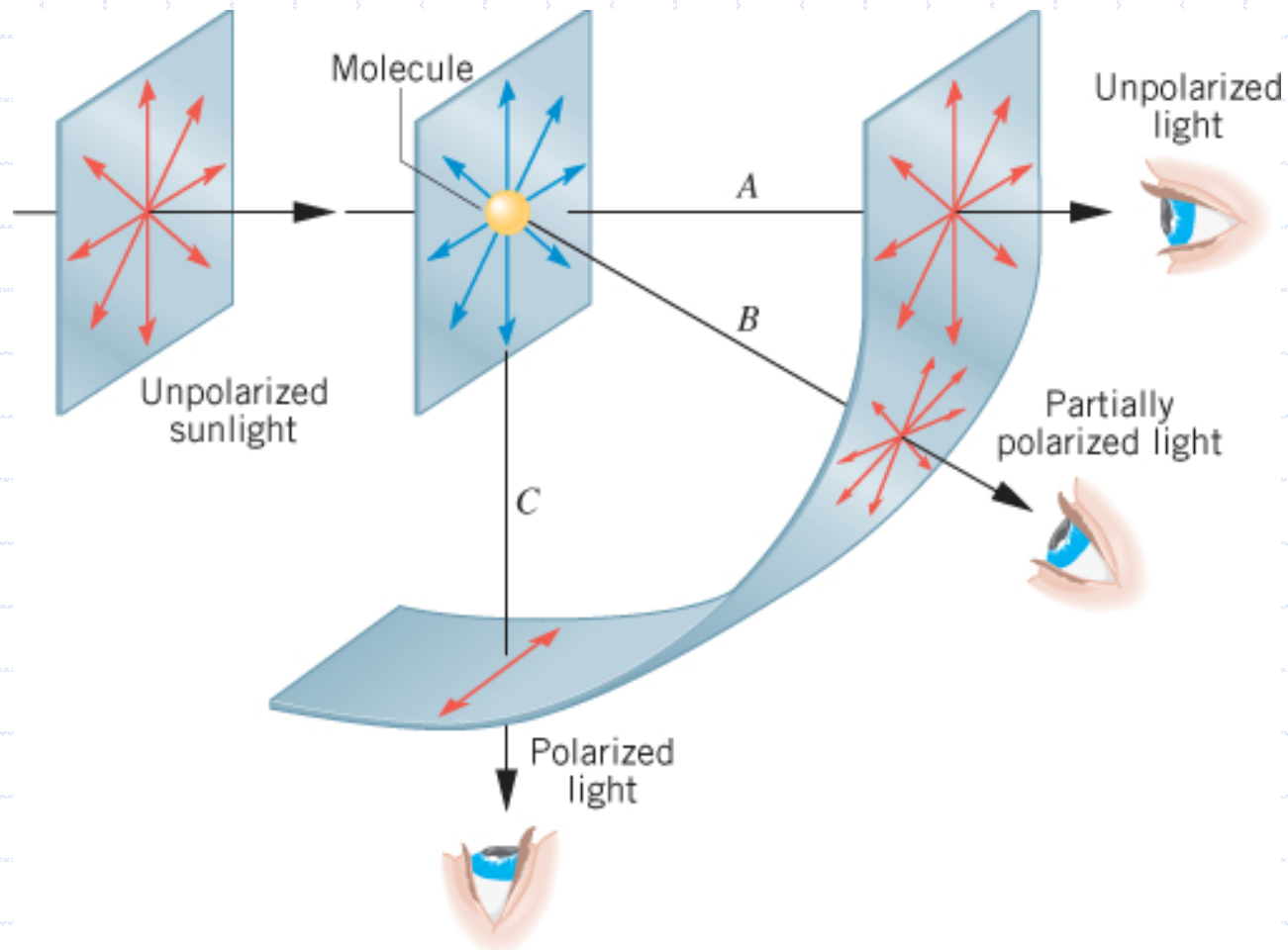
© 2005 Brooks/Cole - Thomson



Polarizacija refleksijom, Brewsterov kut

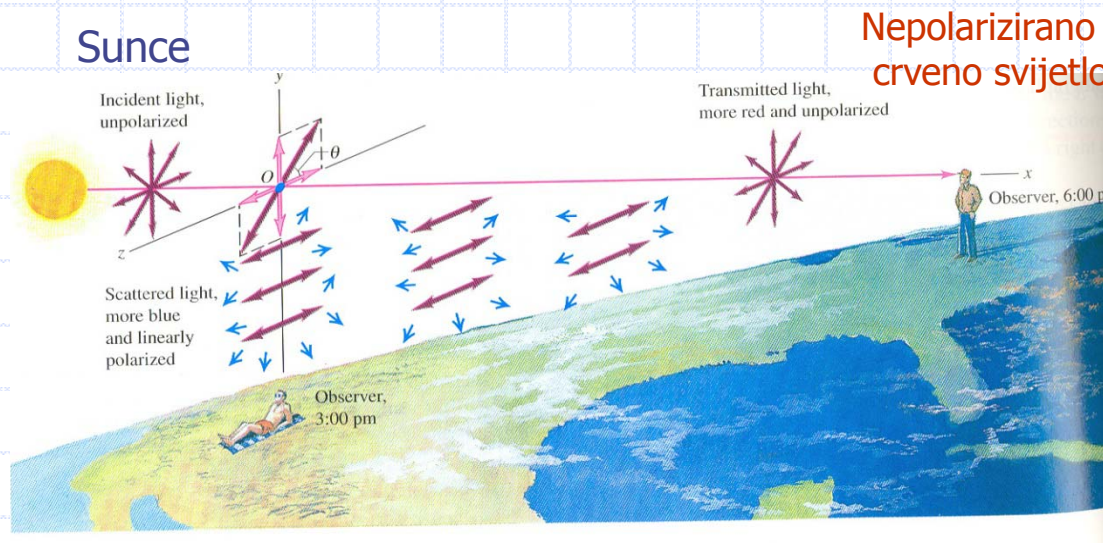


Pojava polariziranog svjetla u prirodi



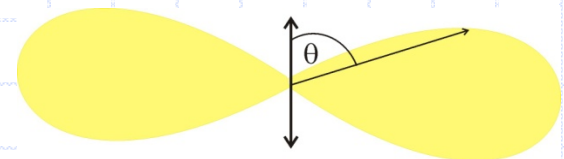
Polarizacija raspršenjem

- ❑ Kad elektromagnetski val (svjetlo) uđe u sredstvo, pod djelovanjem električnog polja u načelu svaki atom postaje električni dipol koji titra.
- ❑ Zbog titranja elektrona uslijed električnog polja svaki atom zrači (apsorbira energiju vala i ponovo je re-emitira u svim smjerovima (atomi su slučajno orijentirani), ova pojava je odgovorna za raspršenje svjetla.
- ❑ Intenzitet raspršenja je $I_s \sim 1/\lambda^4$, što je valna duljina manja to se svjetlo više raspršuje.
- ❑ Intenzitet raspršenog plavog svjetla je $(700\text{nm}/400\text{nm})^4 = 9,4$ puta veći od intenziteta raspršenog crvenog svjetla, pa je zato nebo plavo.
- ❑ Kad se gleda prema Suncu, tj. pri izlasku i zalasku Sunca, svjetlo duže putuje kroz atmosferu, pa kad stigne do površine Zemlje veći dio plave svjetlosti se raspršio, te u snopu Sunčeve svjetlosti blizu površine Zemlje prevladava crvena boja.



Nepolarizirano većinom
crveno svjetlo

Kutna razdioba intenziteta
zračenja električnog dipola



$$I \sim \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

Pitanja za provjeru znanja

1. **Što je disperzija svjetlosti? Što je polarizacija? Što je totalna refleksija?**
2. **Što je normalna, a što anomalna disperzija?**
3. **Objasnite što su Fresnelove jednadžbe.**
4. **Koja su sva moguća stanja polarizacije elektromagnetskog vala? Kako se sve može dobiti polarizirani val?**
5. **Što je totalna refleksija i kad se javlja?**
6. **Izvedite izraz za Brewsterov kut.**
7. **Objasnite Malusov zakon.**
8. **Objasnite polarizaciju raspršenjem.**