Valovanje in optika

Tema 1: Nihanje

Snov: Periodično gibanje, nihajni čas, frekvenca, sinusno nihanje, amplituda, faza, krožilna frekvenca, sile pri nihanju, nihalo na vijačno vzmet, energija nihanja, dušano nihanje, sučno nihalo, matematično in fizično nihalo, vsiljeno nihanje, resonance, sklopljeno nihanje, utripanje

Periodično gibanje: Periodično gibanje pomeni, da je odklon oz. radij vektor po času, ki mu rečemo **nihajni čas** $t_0$enak. $\vec{R}(t+t_0)=\vec{R}(t)$. Fouriereva vrsta nam omogoča, da vsako periodično funkcijo izrazimo s sinusi.
Sinusno nihanje: $x = Asin(\omega t+\delta)$ kjer je A **amplituda** (ravnovesni odmik), $(\omega t+\delta)$ **faza**, $\omega = 2\pi\nu$ **krožilne frekvenca** in je $\nu = \frac{1}{t_0}$ **frekvenca**, legi $x = 0$ pravimo ravnovesna lega. Lahko ga opišemo z diferencialno enačbo: $\ddot{x}+2\beta\dot{x}+\omega_0^2 x=0 \Rightarrow A_0\cos(\omega t)$
Sile pri nihanju: Probamo priti do nihajne enačbe. $\omega^2 = \frac{proznost}{vztrajnost}$. Vodoravno vzmetno nihalo (1), navpično vzmetno nihalo (2)

$$ma = -kx \Rightarrow \ddot{x}+\frac{k}{m}x = 0 \Rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \qquad x = Acos(\omega t) \quad (1)$$

$$m\ddot{x} = -kx+mg; \quad mg = kx_0 \Rightarrow x_0 = \frac{mg}{k} \quad \Rightarrow -k(y+x_0)+mg = m\ddot{y} \Rightarrow \ddot{y}+\frac{k}{m}y = 0 \;\; (2)$$

Sučno nihalo: Imamo vzmet, ki dela navor $\vec{M} = -D\phi$

$$J\alpha = D\phi \Rightarrow \ddot{\phi}+\frac{D}{J}\phi = 0 \Rightarrow \omega^2 = \frac{D}{J} \qquad \phi = \phi_0\cos(\omega t)$$

Matematično nihalo: Približek za male kote. Lahko uporabimo navore.

$$M_g = \vec{l}\times\vec{F_g} = mgl\sin\phi \Rightarrow \quad J\ddot{\phi} = -mgl\sin\phi\,; \;\; \sin\phi\sim\phi \;\; J = ml^2 \Rightarrow \ddot{\phi}+\frac{g}{l}\phi = 0$$

Fizično nihalo: Katerikoli predmet, ki ga vrtimo okoli neke osi. d^* je razdalja od osi do težišča. Imamo spet silo teze ki dela navor $M_g = \vec{d^*}\times\vec{F_g} = mgd^*\sin\phi$. V približku za majhne kote velja:

$$J\ddot{\phi} = -mgd^*\phi \Rightarrow \; \ddot{\phi}+\frac{mgd^*}{J}\phi = 0 \Rightarrow \omega^2 = \frac{mgd^*}{J}$$

Energija nihala: Vztrajnost = kinetična energija, prožnost = potencialna energija

$$W_k = \frac{mv^2}{2}\,; W_{pr} = \frac{kx^2}{2}; \quad x = Asin(\omega t+\delta) \qquad \dot{x} = \omega Acos(\omega t+\delta)$$
$$W_k = \frac{1}{2}m\omega^2A^2\cos^2(\omega t+\delta) \qquad\qquad W_{pr} = \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t+\delta)$$
$$Velja: \frac{mv^2}{2} = \frac{kx^2}{2} \Rightarrow m\omega^2A^2 = kA^2 \quad in \quad W = W_k+W_{pr}$$
$$W = \frac{1}{2}m\omega^2A^2[\sin^2(\omega t+\delta)+\cos^2(\omega t+\delta)] = \frac{1}{2}m\omega^2A^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

Dušeno nihanje: Energija se zgublja zaradi disipativnih sil.$x = Ae^{-\beta t}\cos(\omega t+\delta)\,; \;\; \omega^2 = \omega_0^2-\beta^2$
Nadkritično dušenje: Dušenje je tako veliko, da sploh ne zaniha ampak se počasi vrne v ravnovesje.
Kritično dušenje: Ni nihanja, sistem se vrne v ravnovesje v najkrajšem času možnem.

Vsiljeno nihanje: Pri vsiljenem nihanju nihalu dodajamo energijo z neko frekvenco. Lastno nihanje s časom izzveni, nihalo pa začne nihati z vsiljeno frekvenco. Amplituda takega nihala je največja, če je frekvenca vsiljevanja enaka lastni frekvenci. Takrat pravimo, da je nihalo v **resonanci**.$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = kAsin(\omega t)$. Max moč $P_m = -2m\beta v^2 \;\; FWHM = \frac{2\beta}{\omega_0}$

$$\omega \ll \omega_0 \;\; A_1 \approx A_0 \; \delta = 0; \;\; \omega = \omega_0 \;\; A_1 \gg A_0 \;\; \delta = \frac{\pi}{2}; \;\; \omega \gg \omega_0 \;\; A_1 \ll A_0 \;\; \delta = \pi$$

Sklopljeno nihanje: Vsako nihanje lahko sestavimo iz vsote več nihanj. Recimo, da imamo dve fizični nihali. $\phi_1 = C\sin(\omega_0 t + \delta_{01}) + D\sin(\omega_1 t + \delta_{11})$. Ce imamo n sklopljenih nihal, lahko dobimo n lastnih frekvenc. Nihanje je odvisno od začetnih pogojev. Ce obe nihali odmaknemo za enako amplitudo v nasprotnih smereh, je njuno težišče pri miru (vzmet je notranja sila).

Utripanje: Pojav, ki ga opazimo pri dveh težnih nihalih, če imata lastni frekvenci približno enaki. Dve lastni frekvenci dobimo tako: Najprej obe nihali odklonimo v isto smer, dobimo lastno frekvenco ω_1, potem pa ju odklonimo v obratno smer dobimo ω_2. Zdaj odklonimo pa samo eno, dobimo utripanje. Utripanje lahko gledamo kot nihanje z periodično spreminjajočo amplitudo.

$$\phi_1 = \phi_0\cos(\omega_1 t) + \phi_0\cos(\omega_2 t) = 2\phi\cos\left[\frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1)t\right]\cos(\omega t)$$

$$\phi_2 = \phi_0\cos(\omega_1 t) - \phi_0\cos(\omega_2 t) = 2\phi\sin\left[\frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1)t\right]\sin(\omega t)$$

$$t_u = \frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1}$$

Tema 2: Valovanje

Snov: Sirjenje motenj v proznih sredstvih, valovna enačba, potujoče valovanje v eni razsežnosti, hitrost valovanja, disperzija, fazna hitrost, skupinska hitrost.

Valovanje: Nematerialni prenos energije po »sredstvu«. Enačba $\vec{s}(\vec{R}, t)$ opise val, v 1D pa $\vec{s}(\vec{x}, t)$

Sirjenje motenj v proznih sredstvih: Poznamo dva tipa mehanskega valovanja, **transverzalno** valovanje, kjer je $\vec{s} \perp \vec{c}$ in **longitudinalno**, kjer je $\vec{s} \parallel \vec{c}$. Potujoči val opašemo kot $f(x - ct)$. Newton in Hooke nam data orodje, da opašemo potovanje motnje.

Valovna enačba: Je enačba, ki opisuje različna valovanja. Primer kako jo dobimo:

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta x}{l} \Rightarrow \quad F = SE\frac{\partial s}{\partial x} \;\; (1) \qquad\qquad F = ma = S\rho\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}dx \; (2)$$

Ce odvajamo (1), ju lahko izenačimo:

$$SE\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = S\rho\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \;\; \Rightarrow \;\; \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E}\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}$$

Neodvisnost hitrosti od moči udarca:

$$Fdt = dG = v\,dm = v\,\rho S\,c\,dt \quad in\; F = SE\frac{vdt}{cdt}$$

$$ES\frac{v}{c} = v\rho Sc \Rightarrow E = c^2\rho$$

Potujoče valovanje v eni razsežnosti: $x = A\sin(kx - \omega t) = A\sin(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{t_0}t)$. Casovna perioda je t_0, krajevna perioda pa je **valovna dolžina** λ. $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ pravimo **valovni vektor**. Iz tega sledi $c = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi\lambda}{2\pi t_0} = \nu\lambda$.

Hitrost valovanja: Vzmet: $\sqrt{\frac{k_0 l^2}{m}}$. Natezna sila: $\sqrt{\frac{Fl}{m}}$. Plin: $\sqrt{\frac{\kappa RT}{M}}$

Disperzija: Pojav, kjer je fazna hitrost valovanja odvisna od njegove frekvence (recimo prizma)

Fazna hitrost: Hitrost s katero se siri točka z določeno fazo (recimo en vrh, ki potuje naprej) vzdolž dane smeri (običajno v smeri valovnega vektorja).

Grupna hitrost: Hitrost s katero se ovojnica amplitude premika skozi prostor.

Tema 3: Superpozicija valovanj in energija

Snov: Superpozicija valovanj, stoječe valovanje, odboj valovanja, energija valovanja, energijski tok

Superpozicija valovanj: Z sestavljanjem ali superpozicijo valovanj lahko dobimo novo iz **interference** prejšnjih valovanj. Odmik v eni točki je ob danem trenutku enak vsoti odmikov v vseh valovanjih. (Recimo, da imamo dva valovanji): $s(x,t) = s_1(x,t) + s_2(x,t)$

Med valovanji z enako hitrostjo in amplitudo lahko pride do konstruktivne ali destruktivne interference. Amplituda je odvisna od faznega zamika med valovanji:

$$s_1 = s_0\sin(kx - \omega t + \delta) \quad s_2 = s_0\sin(kx - \omega t) \quad s = s_0[\sin(kx - \omega t + \delta) + \sin(kx - \omega t)]$$
$$s = 2s_0\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\delta}{2}\right) \qquad A = 2s_0\cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Stoječe valovanje: Do stoječega valovanja pride iz superpozicije dveh nasprotno potujočih valovanj (z enako hitrostjo in amplitudo). Stoječe valovanje je nihanje s krajevno odvisno amplitudo. Noben člen nima hkrati časovnega in krajevnega dela, zato to valovanje ne potuje. Lastna frekvenca: $\nu_0 = \frac{c}{\lambda}$ in lastne frekvence višjih redov: $\nu_N = (N+1)\nu_0$

$$s_1 = s_0\sin(kx - \omega t) \quad s_2 = s_0\sin(kx + \omega t)$$
$$s = s_1 + s_2 = s_0[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)] = \underbrace{2s_0\sin(kx)}_{A(x)}\underbrace{\cos(\omega t)}_{Nihanje}$$

Odboj: Valovanje, ki pride k krajišču vrvice ali neke ovire, se odbije in potuje v nasprotni smeri. Pri gibljivo vpetem koncu, se hribček vrne kot hribček, kar pomeni, da se valovanje odbije z enako fazo. Pri fiksno vpetem koncu pa se hribček odbije kot dolina, kar pomeni da se odvije z nasprotno fazo.

Energija potujočega valovanja: Energijska gostota $w = \frac{dW}{dV}$. Velja $w = \rho v^2$ in $w = w_k + w_{pr}$ in $\overline{w}_k = \overline{w}_{pr}$ in $s = s_0\sin(kx - \omega t)$. Iz tega sledi, da je gostota energije $w = \rho s_0^2\omega^2\cos^2(kx - \omega t)$ in da je časovno povprečje $w = \frac{1}{2}\rho s_0^2\omega^2$. Energija potuje skupaj, v ekstremih je energija 0, v ničlah pa max.

Energija stoječega valovanja: Deformacija je $\frac{\partial s}{\partial x}$ in velja vse tako kot prej samo da je $s = Asin(kx)\cos(\omega t)$. $W_k$ima max v ravnovesni legi. Torej velja:

$$w_k = \frac{1}{2}\rho A^2\omega^2\sin^2(kx)\sin^2(\omega t) \quad in \quad w_{pr} = \frac{1}{2}\rho c^2k^2A^2\cos^2(kx)\cos^2(\omega t) \qquad w = \frac{1}{4}\rho A^2\omega^2$$

Energijski tok: Pove koliko energije prenese valovanje: $P = \frac{d\overline{W}}{dt} = Sc\overline{w}$

Gostota energijskega toka: $j = c\overline{w} = \frac{1}{2}c\rho\omega^2 s_0^2$

Tema 4: EM valovanje v vesolju

Snov: Maxwellske enačbe v praznem prostoru, EM valovanje, dipolna antena, koaksialni vodnik

Maxwellske enačbe v praznem prostoru:
V vakumu imata $\vec{E}$ in $\vec{B}$ zaključene silnice in sta brez izvorov

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = 0 \qquad \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Iz indukcijskih zakonov pa lahko pridemo do EM valovne enačbe:

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} d\vec{S} \qquad \oint \vec{H} d\vec{s} = \frac{d}{dt}\int \vec{D} d\vec{S}$$

EM valovanje: Je potujoče valovanje. $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t) \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t)\,; \;\; E = Bc$

$$[E(x+dx) - E(x)]a = -\frac{d}{dt}\vec{B}a\, dx \Rightarrow \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$[B(x+dx) - B(x)]a' = -\mu_0\epsilon_0 \frac{d}{dt}\vec{E}\, a' dx \;\Rightarrow\; \frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

(1) odvajamo po času (2) pa po kraju in potem zdruzimo obe enacbi v:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}; \quad c^2 = \frac{1}{\mu_0\epsilon_0}$$

Da velja $E = Bc$:

$$E_0 \sin(kx - \omega t) = B_0 \sin(kx - \omega t) \Rightarrow E_0 k \cos(kx - \omega t) = B_0 \omega \cos(kx - \omega t) \Rightarrow E_0 = \frac{\omega}{c} B_0 = B_0 c$$

Dipolna antena: Ce odpremo električni nihajni krog v odprtega, tako da sta konca antene pravzaprav plošči kondenzatorja dobimo najbolj osnovno dipolno anteno. Valovanje blizu dipolne antene jo podobno stoječemu EM valovanju (kot v bližini zile koax vodnika). V veliki razdalji od antene pa nastane potujoče elektro magnetno valovanje. Antena seva to valovanje. Osnovna lastna frekvenca dipolne antene je $\nu_0 = \frac{1}{2}\frac{c_0}{l}$ če jo vzbujamo na sredini, in $\nu_0 = \frac{1}{4}\frac{c_0}{l}$ če jo vzbujamo pri krajišču. EM polje antene lahko preverimo z sprejemno anteno (mali ovoj, s kondenzatorjem in žarnico). V navpični smeri pod in nad anteno ni EM polja.

Koaksialni vodnik: To je vodnik, ki je sestavljen iz srednje zile, ki je obdana z dielektričnim izolatorjem in zunanjim plaščem. Uporabljajo se za prenos električnih signalov. Vodnik ima več lastnosti, dolžino, notranji radij r, zunanji radij izolatorja R, dielektričnost in permeabilnost in svojo karakteristično impedanco. Lahko pride do stoječega valovanja, ker se valovanje na koncu lahko odbije.

$$Iz\ Gauss\ el \Rightarrow \vec{E} = \frac{e}{2\pi\epsilon_0\epsilon l r'} \quad U = -\int_r^R E dr' \Rightarrow \frac{C}{l} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln\frac{R}{r}}$$

$$Iz\ Gauss\ mag \Rightarrow \Phi_m = \int_r^R \vec{B} d\vec{S} \Rightarrow \frac{L}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{R}{r}$$

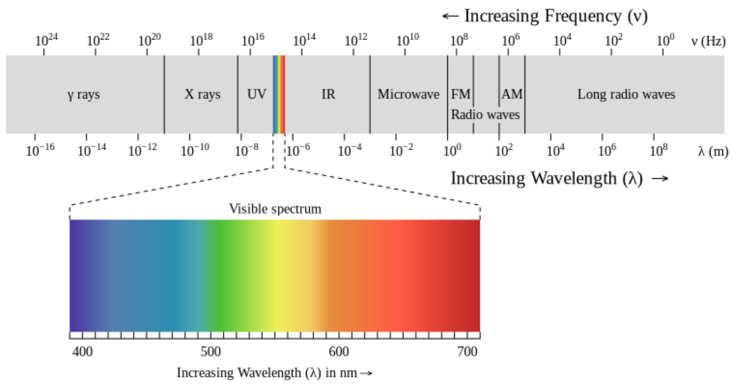
$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ce je impedanca na koncu vodnika enaka impedanci vodnika, potem ne bo prišlo do odbojev.

Tema 5: Energija EM in spekter

Snov: Svetlobni spektri, energija EM valovanja, svetlobni tok, pravokoten vpad na dielektrik (odbojnost, prepustnost).

Svetlobni spektri:



Energija EM valovanja: $\vec{j} = w\vec{c} = (w_e + w_m)\vec{c} \quad w_e = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \quad w_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \Rightarrow \quad \vec{j} = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right)\vec{c} = \epsilon_0 \vec{E}\vec{c}$

Ce imamo sinusno valovanje $\vec{E} = E_0 \sin(kx - \omega t)$, potem je $\vec{j} = \epsilon_0 \vec{c}\, E_0^2 \sin^2(kx - \omega t)$ in povprečna gostota energijskega toka je $\bar{\vec{j}} = \frac{1}{2}\epsilon_0 E_0^2 \vec{c}$ oz. ce zapisemo z mag. poljem $\bar{j} = \frac{1}{2}\frac{B_0^2}{\mu_0}\vec{c}$. Prispevek električne energije je enak prispevku magnetne. Gostota energijskega toka je potem $\vec{j} = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right)\vec{c} = EH \;\Rightarrow$ $\vec{\mathcal{P}} = \vec{j} = \vec{E} \times \vec{H}$ Temu pravimo **Poyntingov vektor**, ki ima smer razširjanja polj in velikost gostote energijskega toka.

Svetlobni tok: Pove količino izsevane energije v časovni enoti. $dP = \vec{j} dS$

Pravokoten vpad na dielektrik: Pri pravokotnem vpadu EM na dielektrik se lahko zgodi, da se del valovanja odbije, del pa prodre v dielektrik. Velja: $E_{vpadni} - E_{odbiti} = E_{prepustni}$. Vpadni in odbiti val sta v snovi z n_1 prepustni pa v snovi z n_2.Prepustni val gre vedno naprej (1). Odbiti val lahko ohrani smer ali pa se odbije na optično gostejši snovi (2).

$$\frac{E_v}{c_1} - \frac{E_o}{c_1} = \frac{E_p}{c_2} \Rightarrow n_1(E_v - E_o) = n_2 E_p \Rightarrow \frac{E_p}{E_v} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \;(1) \qquad \frac{E_0}{E_v} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \;(2)$$

Gostota energijskega toka je odvisna od lomnega količnika snovi: $\vec{j} = \frac{1}{2} n \epsilon_0 E^2$. Iz tega lahko definiramo odbojnost R in prepustnost T:

$$\frac{j_{od}}{j_{vp}} = R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \qquad \frac{J_{pr}}{j_{vp}} = T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

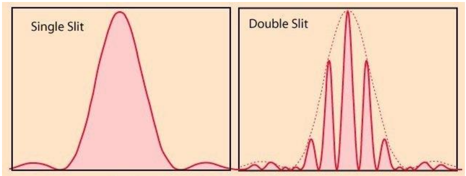
Tema 6: Valovna optika

Snov: Uklon svetlobe, Huygensovo načelo, interferenca svetlobe, reza, uklonska mrežica, tanka plast

Huygensovo načelo: Vsaka točka deluje kot izvir krogelnega valovanja v smeri sirjenja valov oz. valovanje v smeri naprej, dobimo z interferenco (superpozicijo) krožnih valov.

Uklon svetlobe: Pojav je posledica interference krogelnih virov valovanj in je najbolj očiten pri režah, ki so velikosti valovne dolžine valovanja. Zaradi interference dobimo razklonjeno svetlobo, ki nam dela interferenčno sliko in prikazuje kje so ojačitve valovanja. Za ojačitve velja enačba:

$$d \sin \beta = N\lambda$$

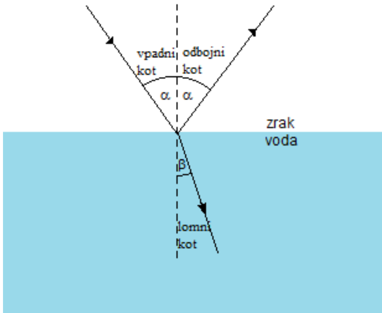


Interferenca svetlobe: Krogelna valovanja med sabo interferirajo.
Reza: Ce je reza zelo drobna, dobimo samo en vir krogelnega valovanja, kar ni zanimivo, ampak če je malo večja pa dobimo več krogelnih virov svetlobe, ki že malo interferirajo med sabo, dobimo uklonsko sliko $j = j_0 \frac{\sin^2 x}{x^2}$. Ce pa imamo dve rezi pa dobimo bolj zrnato sliko.
Uklonska mrežica: Z N režami dobimo sliko $j = j_0 \frac{\sin^2(Nx)}{\sin^2(x)}$. Lahko nam razloči barvne komponente svetlobe zato, ker je uklonski kot svetlobe odvisen od valovne dolzine.
Tanka plast: Interferenčni pojav se opazi na tankih plastik (olje, milni mehurček). Raznobarvni vzorci se pojavijo zaradi interference med odbitimi valovanji z nasprotnih strani take plasti. Debelina plasti spremeni, katera valovna dolžina se ojača.
Faza: Optična pot valovanja se podaljša za lomni količnik, zato lahko pade en del valovanja ven iz faze in pride do interference. (1) za ojačitev in (2) za oslabitev.

$$\delta = kd = \frac{2\pi}{\lambda} d = \frac{2\pi}{\lambda_0} nd \qquad \delta = N2\pi \quad (1) \qquad \delta = \pi(2N+1) \quad (2)$$

Tema 7: Geometrijska optika

Snov: Odboj in lom svetlobe, lomni količnik, disperzija svetlobe, zorni kot, zenica, Rayleighov kriterij, ločljivost optične naprave
Lomni količnik: Razmerje med hitrostjo EM valovanja v vakumu in fazno hitrostjo valovanja v svetlobi:$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\mu\epsilon}$
Oboj svetlobe: Odbojni zakon pravi, da je odbojni kot enak vpadnemu. $\alpha = \alpha'$
Lom svetlobe: Pri prehodu med dvema snovema v katerih se svetloba siri z različnima hitrostma c in c' se svetloba lomi. Velja **lomni** zakon:



$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c}{c'} \Rightarrow \quad n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta$$

Kjer je α vpadni kot in β lomni kot. Svetloba se lomi, če je lomni kot med 0° in 90°, drugače se v celoti odbije. Pri prehodu na optično gostejšo snov je $\beta < \alpha$, pri prehodu na opticno redkejšo snov pa $\beta > \alpha$. Pri prehodu v optično redkejšo snov lahko pride do **totalnega** odboja kar je, ko bi bil $\beta > 90°$. Mejni kot je $\alpha_m = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right)$
Disperzija svetlobe: Lomni količnik snovi, je odvisen od λ, torej je tudi hitrost v snovi odvisna od λ.
Zorni kot: Za oddaljen predmet ne vemo njegove razdalje in velikosti, vemo pa zorni kot pod katerim vidimo predmet. $h = f\tan\theta = f\theta$
Zenica: Velikokrat rišemo v skice pomožne žarke ampak je pomembno da vemo katere dejansko preučujemo. Skupni presek vseh šopov žarkov ,ki sodelujejo pri preslikavi (skozi neko optično napravo) imamo na strani predmeta **vstopno zenico** in na strani slike **izstopno zenico**. Pri očesu, fotoaparatu in lupi se izstopna zenica ujema z vstopno. Pri očesu je zenica zenica, pri fotoaparatu je odprtina zaslonk…
Ločljivost optične naprave: Uklon na vstopni zenici preprečuje ∞ povečavo mikroskopa. Najmanjši kot α_0 pri katerem moramo sklepati za dve svetili je določen z **Rayleighovim** kriterijem (1), za okrogle odprtine pa velja (2):

$$R = \frac{\lambda}{D} \ (1) \qquad R = 1.22\frac{\lambda}{D} \quad (2)$$