

12 Svetlobni žarki

Svetlobni žarki – Odboj – Lom – Razklon – Preslikave – Oko – Lupa – Mikroskop – Daljnogled – Čuda neba

12.1 Svetlobni žarki

Svetila Vsakdanje izkušnje učijo, da iz svetil, recimo iz Sonca ali ognja, nekaj izhaja in se širi v ravnih črtah – žarkih – v vse smeri. Tisto nekaj poimenujemo svetloba. Če svetlobni žarek zadene kakšno oviro, se na njej odbije. Svet vidimo vzdolž tistih žarkov, ki vpadajo v naše oči. Najpreprosteje je, če si predstavljamo, da je svetloba tok posebnih delcev, fotonov.

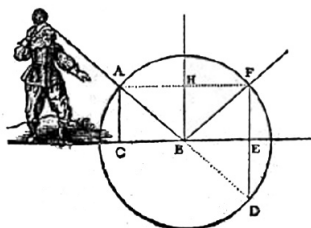
12.2 Odboj

Zrcaljenje Ko pogledamo v mirno jezero, vidimo v njem *sliko* dreves, ki rastejo na obrežju. Rečemo, da se okolica *zrcali* v jezeru oziroma da je gladina jezera *zrcalo*. Če se nagnemo navpično nad vodo, pa vidimo celo sliko samih sebe. Tudi zloščena kovinska plošča je zrcalo. Kaj od okolice vidimo v njej, je odvisno od tega, kako jo obrnemo in od kod jo gledamo. Očitno je takšna priprava zelo koristen pripomoček, če ne za kaj drugega, pa za osebno lišpanje. Iskanje čim boljših zrcal privede sčasoma do steklene plošče s posrebreno zadnjo stranjo. To je *stekleno zrcalo*.

Odbojni zakon Kako se pa pri zrcaljenju svetloba odbija? Žarek svetlobe naj vpadna iz zraka na vodno gladino ali na kakšno drugo zrcalo poševno pod kotom α_i glede na vpadno pravokotnico. Merjenje pokaže, da leži odbiti žarek v ravnini, ki jo tvorita vpadni žarek in vpadna pravokotnica, in da je odbiti kot α_r enak vpadnemu:

$$\alpha_r = \alpha_i. \quad (12.1)$$

To je *odbojni zakon* (EVKLID). Velja za gladke ravne površine. Če je površina hrapava, pa velja za vsako njeno ploskvico posebej.

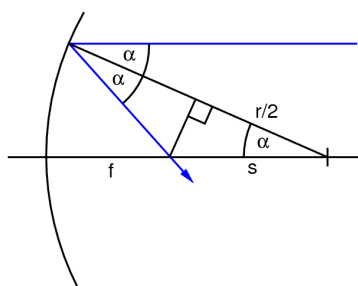


Slika 12.1 Odboj svetlobe na meji dveh snovi. Odbojni kot je enak vpadnemu. (Descartes, 1637)

Odbojni zakon sprejmemo do nadaljnjega kot eksperimentalno dejstvo. Marsikomu pa to ni dovolj in ga poskuša izpeljati iz kakšnih drugih "bolj osnovnih" resnic. Znan je naslednji razmislek. Odbojni kot bi lahko bil večji, manjši ali enak vpadnemu. Predpostavimo, da je manjši. Naj predmet in opazovalec zamenjata mesti. Sedaj bi moral biti kot večji. To je nesprejemljivo. Kota morata torej biti enaka.

Zbiralno zrcalo

Zrcalo preusmerja žarke, ki padajo nanj od koderkod, vsakega v skladu z odbojnim zakonom. Posebej odlikovani so žarki, ki prihajajo neposredno od Sonca: njihov odboj ustvarja v okolici, na primer na zidu, svetlo liso. Otroci ji pravijo "zajček", ker pač tako hitro skače, ko vrtimo zrcalo. Če isto mesto na zidu osvetljuje več zrcal hkrati, postane zajček svetlejši. Ko tja postavimo roko, pa čutimo povečano segrevanje. Očitno bi lahko s primerno razporeditvijo mnogih zrcal usmerili Sončeve žarke v eno točko, kjer bi z njimi prižigali snovi. Ponuja se vboklo *krogelno zrcalo*. Risba in poskus, oba pokažeta, da takšno zrcalo res preoblikuje vzporeden snop žarkov v stožčastega. Točko, kjer se žarki sekajo, poimenujemo *gorišče*.



Slika 12.2 Odboj svetlobe na krogelnem zrcalu. Vzporedni žarki se zbirajo v gorišču. Goriščna razdalja znaša polovico krivinskega polmera.

Slika pove $(r/2)/s = \cos \alpha$. Če je kot α majhen, je kosinus približno enak 1 in

$$f = \frac{r}{2}. \quad (12.2)$$

Enačba velja za žarke, ki so blizu osi, to je za zrcala, katerih premer je majhen v primerjavi z radijem ukrivljenosti. Bolj oddaljeni žarki imajo gorišče bližje temenu.

12.3 Lom

Ravna palica, ki jo poševno vtaknemo v jezero, je videti pri gladini zlomljena. Očitno se žarki, izhajajoči iz potopljenega dela, na gladini lomijo. Predvidevamo, da se vsak žarek, ki vпада iz ene prozorne snovi v drugo, recimo iz vode v zrak ali iz zraka v vodo, razcepi v dva žarka: eden se odbija nazaj in drugi se lomi naprej. Merjenje kotov potrди domnevo in pokaže naslednje.

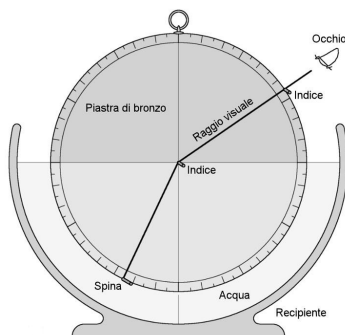
Lomni zakon

Vpadni, odbiti in lomni žarek ležijo v isti ravnini. Pri prehodu iz zraka v vodo je lomni kot α_t glede na izstopno pravokotnico manjši kot vpadni kot α_i . Če obrnemo smer žarka, se lomna pot ne spremeni. Za različne vpadne kote iz zraka v vodo velja

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = n. \quad (12.3)$$

To je *lomni zakon* (SNELL). Konstanta n pove, kako močno se žarek lomi; poimenujemo jo *lomni količnik* in je odvisna od vrste snovi. Za vodo znaša 1,3 in za steklo 1,5. Snov z večjim lomnim

količnikom bomo poimenovali optično gostejšo. Steklo je torej optično gostejše od vode.



Slika 12.3 Lom svetlobe na vodni gladini. Prikazana je naprava za udobno merjenje vpadnih in lomnih kotov. (Museo Galileo, Firenze)

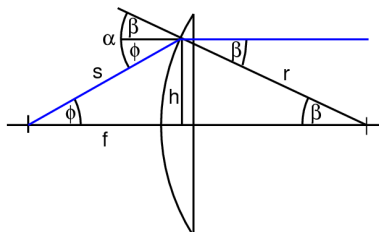
Lomni količnik n opisuje lom žarka pri prehodu iz ene snovi v drugo, recimo iz zraka v vodo. Kadar je potrebna večja natančnost izražanja, mu rečemo *relativni* lomni količnik n_{12} . Prehod iz vakuumu v eno ali drugo snov pa opisuje *absolutni* lomni količnik n_1 ali n_2 . Absolutni lomni količnik zraka je praktično enak 1. Primerjava izmerjenih absolutnih in relativnih količnikov za vodo in steklo pokaže

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (12.4)$$

Za lom iz vode v steklo torej velja $n = 1,5/1,3 = 1,15$. Žarek se lomi manj, kot bi se, če bi vpadal iz zraka v steklo.

Popolni odboj Žarek, ki vpada iz optično gostejše v optično redkejšo snov, recimo iz vode v zrak, se lomi proč od vpadne pravokotnice. Pri dovolj velikem vpadnem kotu doseže lomni kot 90° . Pri še večjem kotu pa se žarek sploh ne lomi več, ampak se le odbije. Ta mejni kot poimenujemo kot popolnega odboja in je določen z lomnim zakonom $1/\sin \alpha = n$. Za prehod iz vode v zrak znaša 49° . Ribam, ki gledajo navzgor, se kaže celotni zunanji svet skozi omejen nadglaviščni krog.

Zbiralna leča Videli smo, da primerno ukrivljena odbojna površina – zbiralno zrcalo – preoblikuje vzporeden snop žarkov v stožčastega; žarki se sekajo v gorišču. Pričakujemo, da kaj takega zmore tudi primerno ukrivljena lomna površina. Pravzaprav jo že poznamo [4.7]: to je krogelna ploskev na vsaki strani *zbiralne leče*.



Slika 12.4 Lom svetlobe na plankonveksni leči. Vzporedni žarki se zbirajo v gorišču.

Iz risbe ugotovimo naslednje. Naj bodo koti φ , β in α majhni, tako da so njihovi sinusi enaki kotom samim. Potem velja $h/s = \varphi$,

$h/r = \beta$ in $\alpha = \varphi + \beta$. Iz prvih dveh enačb izrazimo h in ju izenačimo. V dobljeno enačbo vstavimo kot φ iz tretje enačbe, delimo z β in upoštevamo lomni zakon $\alpha/\beta = n$. Tako dobimo

$$\frac{1}{f} = (n-1) \frac{1}{r}. \quad (12.5)$$

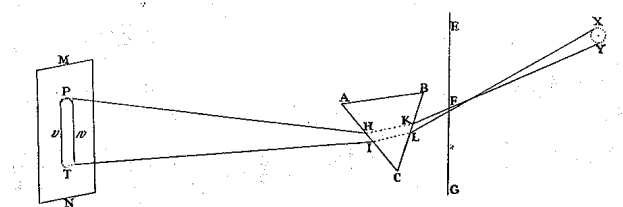
Če staknemo dve "plankonveksni" leči z radijema r_1 in r_2 v "bikonveksno" lečo, se kar ne moremo upreti domnevi, da ima slednja goriščno razdaljo

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (12.6)$$

Bolj kot je leča zakrivljena, krajša je torej njena goriščna razdalja. Enačba velja za leče, ki so tanke v primerjavi z goriščno razdaljo, in za žarke, ki so blizu osi. Bolj oddaljeni žarki imajo krajše goriščne razdalje. Lomni količnik je relativen glede na okolišnje snov: leča, potopljena v vodo, ima večjo goriščno razdaljo kot na zraku.

12.4 Razklon

Mavrica Svetloba, ki jo leča zbere v gorišču, ima barvaste robove. Kaže, da je bela sončna svetloba sestavljena iz raznovrstnih žarkov, ki se različno lomijo in jih vidimo kot različne barve. Ta *razklon svetlobe* je bolje viden, ko namesto leče vzamemo trikotno stekleno prizmo in nanjo spustimo ozek žarek svetlobe. Žarek se po dvakratnem lomu skozi rob prizme na zaslonu razpotegne v mavrični trak – *svetlobni spekter* (NEWTON). Najmanj se lomi rdeča in najbolj vijolična svetloba. Druga, nasprotno obrnjena prizma spekter spet združi v belo svetlobo.

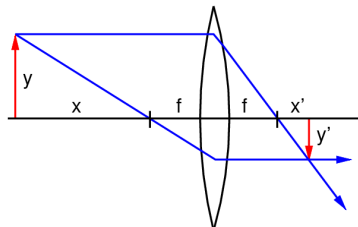


Slika 12.5 Razklon sončne svetlobe v barvni spekter pri prehodu skozi stekleno prizmo. (Newton, 1730)

Barve predmetov S tem je razložena uganka barv pri različnih predmetih. Vrtnica je rdeča, ker pač najbolj odbija rdečo svetlobo, druge pa bolj ali manj vpija. Obarvano steklo je modro, ker prepušča modro svetlobo, ostale pa vpija. Ko rdečo vrtnico pogledamo skozi modro steklo, pa je seveda črna.

12.5 Preslikave

Lečenje Iz vsake točke telesa izhajajo svetlobni žarki. Ko padejo na lečo, jih ta lomi. Risba pokaže, da se žarki iz predmeta, postavljenega pred prvo gorišče, združijo v sliko predmeta za drugim goriščem. Slika je obrnjena in se prikaže na zaslonu.



Slika 12.6 Preslikava predmeta z lečo.

Dva podobna trikotnika na levi strani povesta $y/x = y'/f$, tista dva na desni pa $y'/x' = y/f$. Iz vsake enačbe izrazimo y/y' , ju izenačimo in dobimo $xx' = f^2$. Če upoštevamo še $x = a - f$ in $x' = b - f$, pa ugotovimo

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (12.7)$$

Predmet na razdalji a pred lečo se preslika na razdaljo b za njo. Neskončno oddaljen predmet ima sliko v gorišču. Bolj ko se predmet bliža prvemu gorišču, bolj se njegova slika oddaljuje od drugega gorišča. Predmet v gorišču naredi sliko v neskončnosti. Kadar pa je predmet bližje od gorišča, nastane njegova navidezna slika na isti strani leče in je na zaslon ne moremo ujeti.

Sestavljene leče Če staknemo dve leči, delujeta kot ena sama. Rečemo, da je to *sestavljena leča*. Kakšna je njena goriščna razdalja? Svetilo postavimo v gorišče f_1 prve leče. V presledku med lečama nastane vzporeden snop žarkov, ki ga druga leča zbere v svojem gorišču f_2 . Naj bosta leči tanki in blizu skupaj, da za lečje velja $1/a + 1/b = 1/f$. Ker $a = f_1$ in $b = f_2$, sledi

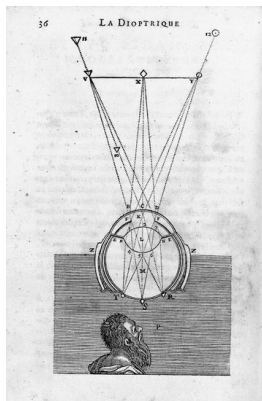
$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}. \quad (12.8)$$

Pri tesnem sestavljanju tankih leč se torej seštevajo recipročne goriščne razdalje. Izdelovalci leč jim rečejo *lomnosti* in njihovo enoto $1/m$ poimenujejo *dioptrija*. Ko pravilo o seštevajanju lomnosti uporabimo za dve plankonveksni leči, ugotovimo, da je dosedanja domneva o gorišču bikonveksne leče (12.6) dokazana.

Akromatsko lečje Pri preslikavah moti razklon svetlobe. Omilimo ga tako, da namesto ene leče uporabimo dve staknjeni leči, izboklo zbiralno in vboklo razpršilno, vsako iz stekla z drugačnim lomnim količnikom. Razpršilna leča razklanja svetlobo v obratni smeri kot zbiralna in prvotni razklon izniči; hkrati pa zaradi manjšega lomnega količnika ne izniči vse konvergence snopa in lečje ostaja zbiralno. Takšno dvojico leč imenujemo *akromat*.

12.6 Oko

Človeško oko je okrogla lupina z odprtino, v kateri je leča. Pred lečo je zakrivljena prozorna roženica. Lupina je napolnjena s prozorno steklovino. Roženica in leča sestavljata lečje, ki meče obrnjeno sliko na ozadje lupine, na mrežnico. Tam so čutnice, ki sporočajo svoje stanje v možgane po vidnem živcu. Možgani to stanje "vizualizirajo", to je, mi vidimo. Posebne mišice spreminjajo zakrivljenost leče in tako ostrijo sliko. Med roženico in lečo je spremenljiva zaslonka, zenica. V močni svetlobi se oži in v šibki se širi.

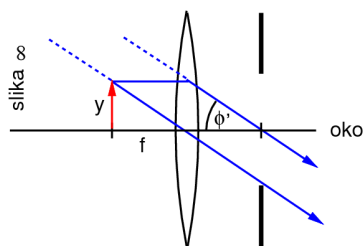


Slika 12.7 Potek žarkov pri očesu. Ukrivljena roženica in leča preslikata predmet v sliko na mrežnici. Da pade slika točno na mrežnico, skrbi leča, ki jo posebne mišice bolj ali manj krivijo. (Descartes, 1637)

Očala Včasih oko in leča nimata prave oblike ali pa leča ne zmore dobro ostriti slike. Če se snop vstopajoče svetlobe seka pred mrežnico, je goriščna razdalja prekratka in ostro vidimo le bližnje predmete. Oko je *kratkovidno*. Če se snop seka za mrežnico, je goriščna razdalja predolga in ostro vidimo le oddaljene predmete. Oko je *daljnovidno*. Obe napaki zlahko popravimo: pred oko namestimo ustrezno razpršilno ali zbiralno lečo – *očala*.

12.7 Lupa

Čim bolj od blizu gledamo predmet, tem večji se nam kaže. Normalno oko lahko gleda predmet še pri najkrajši razdalji $d_0 = 25$ cm. Če predenj postavimo zbiralno lečo, lahko predmet še bolj približamo očesu in ga vidimo večjega. To je *lupa*. Z njo gledamo drobne predmete. Za normalno oko je najbolje, če je predmet v gorišču lupe. Tedaj se očesu zdi, da gleda predmet v neskončnosti in se mu ni treba naprezati.



Slika 12.8 Potek žarkov pri lupi. Predmet, postavljen v gorišče leče, se kaže, kot da bi bil v neskončnosti. Oko ga lahko gleda brez naprezanja.

Čim krajšo goriščno razdaljo f ima lupa, pod tem večjim kotom φ' vidimo predmet. Rečemo, da ima lupa večjo *povečavo*. Slednjo

definiramo kot razmerje med naklonoma, pod katerima vidimo opazovani predmet z lupo in brez nje, torej

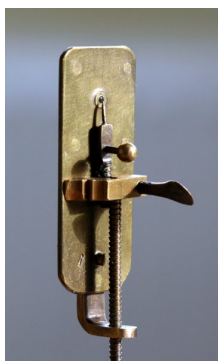
$$N = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi}. \quad (12.9)$$

Za golo oko velja $y/d_0 = \tan \varphi$. Iz risbe razberemo $y/f = \tan \varphi'$. Razmerje obeh tangensov pove

$$N = \frac{d_0}{f}. \quad (12.10)$$

Svet žuželk

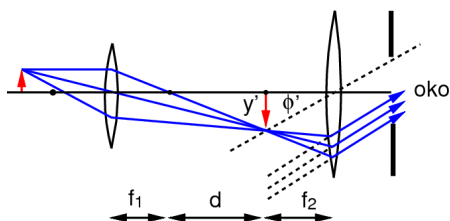
Drobne lupe dosegajo povečave do nekaj desetkrat in pokažejo čudežni svet žuželk.



Slika 12.9 Replika lupe za gledanje majhnih predmetov, ki jo je uporabljal A. Leeuwenhoek. Opazovani predmet je nameščen na konici igle. (Museum Boerhaave, Leiden)

12.8 Mikroskop

Povečano sliko, ki jo ustvari lupa (objektiv), lahko pogledamo skozi drugo lupo (okular). To je *mikroskop*.



Slika 12.10 Potek žarkov pri mikroskopu. Objektiv naredi povečano sliko predmeta v goriščni ravnini okularja. Ta deluje kot lupa in sliko dodatno poveča.

Risba pokaže $y'/f_2 = \tan \varphi'$. Za golo oko že poznamo $y/d_0 = \tan \varphi$. Razmerje tangensov je torej $y'd_0/yf_2$. Ker pa velja še $y'/d = y/f_1$, ugotovimo, da znaša povečava

$$N = \frac{d}{f_1} \frac{d_0}{f_2}. \quad (12.11)$$

Pri tem je d razdalja med notranjima goriščema obeh lup.

Svet mikrobov

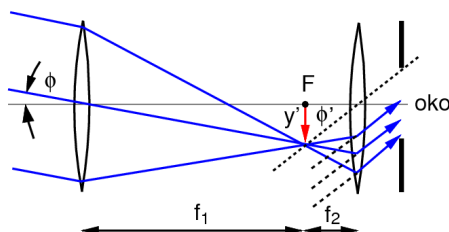
Mikroskop povečuje do nekaj stokrat. Z njim odkrijemo in preučujemo svet enoceličnih bitij. V krvi odkrijemo rdeče krvničke in v semenu semenčice. Opazovani predmet moramo močno osvetljevati, najbolje z vboklim zrcalom, ker je drugače slika pretemna. Pri velikih povečavah postaja slika neostra.



Slika 12.11 Replika mikroskopa za gledanje drobnih premetov, ki ga je uporabljal R. Hooke. Opazovani predmet je osvetljevan s svečo skozi zbiralno stekleno kroglo. (Science Museum, London)

12.9 Daljnogled

Oddaljenih predmetov ne moremo približati, lahko pa jih z dolgogoriščno zbiralno lečo (objektivom) preslikamo v njeno gorišče in sliko opazujemo s kratkogoriščno lupo (okularjem). To je *daljnogled*.



Slika 12.12 Potek žarkov pri daljnogledu. Objektiv naredi sliko neskončno oddaljenega predmeta v goriščni razdalji okularja. Ta deluje kot lupa in sliko poveča.

Za objektiv velja $y'/f_1 = \tan \varphi$ in za okular $y'/f_2 = \tan \varphi'$. Razmerje tangensov, torej povečava, je enaka razmerju obeh goriščnih razdalj:

$$N = \frac{f_1}{f_2}. \quad (12.12)$$

Prikazani daljnogled daje obrnjeno sliko. Pri opazovanju neba to ne moti, drugače pa sliko naravnamo z vključitvijo še ene zbiralne leče ali dveh prekrizanih prizem pred okular. Namesto zbiralne leče lahko uporabimo tudi zbiralno zrcalo, ki svetlobe ne razklanja.

Oddaljeni predmeti

Daljnogledi tipično povečujejo od nekajkrat do nekaj stokrat. Ostro oko lahko torej z njimi razločuje kote, dosti manjše od $1'$. Zaradi priročnosti zato vpeljemo *kotno sekundo* kot $1'' = (1/60)'$. Vendar pa velja naslednje. Če je povečava prevelika in premer objektiva premajhen, postane slika razsežnih predmetov temna, ker objektiv ne zbere dovolj svetlobe. N -kratna povečava zahteva N^2 -krat več svetlobe. Presek objektiva mora zato biti N^2 -krat večji od preseka zenice, to je, njegov premer mora biti N -krat večji od njenega. Premer zenice je tipično 5 milimetrov. Desetkratna povečava zato zahteva premer objektiva 5 centimetrov, stokratna

pa že pol metra. Pri takšni povečavi začne motiti migetanje slike, ki ga povzročajo spremembe lomnega količnika v ozračju.



Slika 12.13 Daljnogled za gledanje oddaljenih predmetov. Prikazana je replika prvega zrcalnega daljnogleda, ki ga je lastnoročno izdelal I. Newton. Namesto zbiralne leče na začetku cevi uporablja zbiralno zrcalo na njenem koncu. Svetloba se odbija naprej, kjer jo majhno poševno zrcalo usmeri v stran v okular. (Science Museum, London)

Daljnogleda namestimo na kotomere in s tako narejenimi *teodoliti* močno izboljšamo triangulacijske meritve. Daljnogledi so tudi zelo uporabni na jadrnicah za odkrivanje nevarnih čeri. Ko pa jih usmerimo v nebo, se nam odkrije nov svet.

12.10 Čuda neba

Vesoljski svet

Že majhen daljnogled pokaže naslednje (GALILEI).

Na nebu je mnogo več zvezd, kot jih vidi golo oko. Večji kot je premer objektiva, bolj šibke zvezde postanejo vidne.

Mlečna cesta razpade na gosto kopreno iz zvezd. Ne glede na povečavo pa ostajajo vse zvezde točkaste.

Na Mesecu zrastejo gore in vržejo sence.

Sonca ne smemo gledati neposredno skozi daljnogled, ker bi bilo to zadnje, kar bi videli v življenju. Opazujemo ga s projiciranjem na zaslon za okularjem in odkrijemo temne pege, ki izdajo vrtenje. Najhitrejše so pege na ekvatorju; njihov obhodni čas znaša 24 dni.

Planeti se pokažejo kot drobne okrogle ploskvice, torej krogle.

Venero krasijo mene prav kakor Mesec, in s tem potrdijo, da je notranji planet.

Okrog Jupitra krožijo štiri drobne lune; včasih ga prečkajo in drugič se skrivajo za njim.

Saturn pa pokaže svoj obroč.

Kakšna čuda še čakajo, da jih odkrijemo? ☐