

Disperzija svetlobe

Janez Strnad

V Mednarodnem letu svetlobe je zanimivo pregledati, kako so fiziki spoznavali nove pojave s svetlobo. Disperzijo ali razklon svetlobe je prvi raziskal Isaac Newton proti koncu sedemdesetih let 17. stoletja. Vijolična svetloba se v steklu lomi bolj kot rdeča. Rdeča svetloba v steklu potuje z večjo hitrostjo kot vijolična. Pojav ima zanimive posledice. S tem podrobneje pogledamo v *Malo zgodovino svetlobe*.

Nekdaj so krošnjarji na sejmi prodajali majhne kose stekla, s katerimi je bilo mogoče v Sončevi svetlobi opazovati mavrice. Pri poskusih v laboratorijih so uporabljali steklene prizme. Poskuse s prizmami so delali Francesco Maria Grimaldi, Robert Boyle, Robert Hooke in drugi. Tedaj so mislili, da je osnovna sestavina svetlobe bela Sončeva svetloba in da barve nastanejo, ko se nekaj te svetlobe absorbira. Mislili so tudi, da se svetloba vseh barv lomi enako.

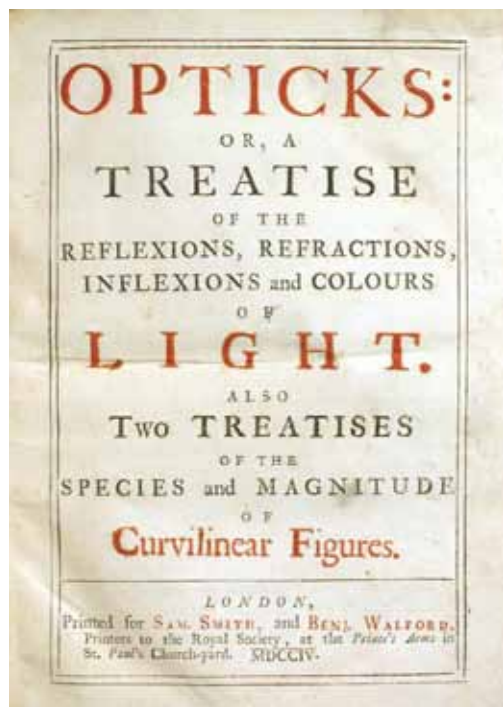
Isaac Newton je bil rojen leta 1642 v Woolsthorpu na kmetiji. Pri kmetovanju se ni izkazal. Poslali so ga na camбриško univerzo, na kateri je študij končal leta 1665. Tedaj so zaradi kuge zaprli univerzo. Med prisilnimi počitnicami v domači vasi je naredil načrte za raziskovanja. Po vrnitvi v Cambridge je leta 1669 postal profesor za matematiko. Uspehi pri poskusih s svetlobo so mu leta 1672 odprli pot v Kraljevo družbo, angleško akademijo znanosti. Leta 1687 je izšla njegova knjiga Matematični principi filozofije narave s tremi Newtonovimi zakoni gibanja in gravitacijskim zakonom. S temi zakoni je zajel gibanje teles na Zemlji in v vesolju. Pozneje v fiziki ni več veliko raziskoval. Leta 1696 je postal nadzornik kovnice denarja v Londonu in tri leta pozneje njen upravnik. Leta 1703 so ga izvolili za predsednika Kraljeve družbe. Umril je leta 1727. Pokopali so ga v westminstrski katedrali. Newton je skupaj z Gottfriedom Wilhelmom Leibnizem razvil infinitezimalni račun. Napisal je veliko spisov v alkimiji in teologiji, ki so postali znani šele v zadnjem času.



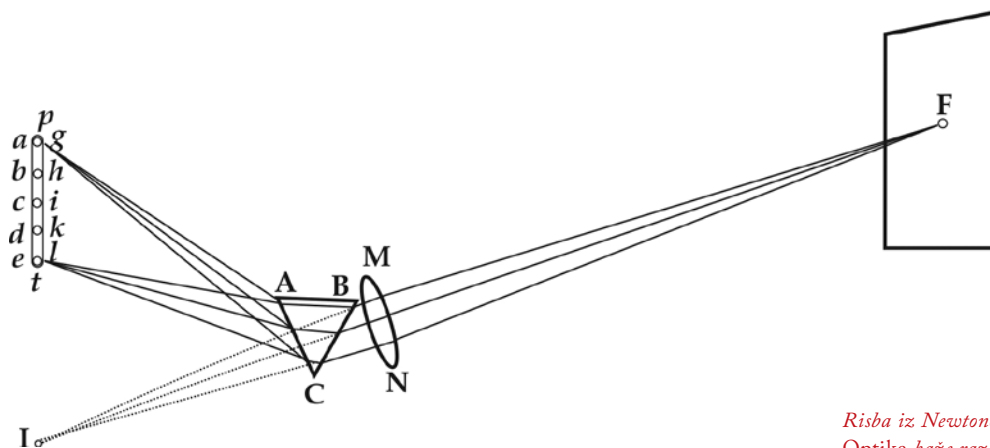
Newton je večino poskusov s svetlobo naredil v letih med 1669 in 1672, ko je na cambriški univerzi predaval o svetlobi. Pri opazovanju z daljnogledom so motili obarvani robovi slik. Na eni strani se jim je izognil z daljnogledom z ukrivljenim zrcalom namesto z lečo. Na drugi strani je s prizmo barve

podrobneje raziskal. V zatemnjeni sobi je prizmo postavil v curek Sončeve svetlobe in na zaslonu opazoval mavrico, *spekter*. Pojav je imenoval *disperzija*, *razklon*. Curek Sončeve svetlobe je imel krožni presekok, mavrica pa je bila podolgovata. *Mavrične barve* so se različno lomile. Najbolj se je odklonila vijolična svetloba, manj po vrsti modra, zelena, rumena, oranžna in rdeča.

Poskus je ponovil v številnih izvedbah. Mavrična svetloba se na drugi prizmi ni več razklonila. Mavrico je zbral z drugo prizmo v belo svetlobo. To ga je prepričalo, da mavrične barve ne nastanejo zaradi absorpcije bele svetlobe, ampak sestavljajo belo svetlobo. Razločeval je enostavne, to je mavrične, in sestavljene barve. Oranžna je mavrična barva ali jo je na primer mogoče sestaviti iz rumene in rdeče. Belo svetlobo je mogoče sestaviti iz vseh mavričnih barv ali iz dveh ali treh mavričnih barv. Ugotovil je, da se mavrične barve razlikujejo po *lomnosti*, danes bi rekli po *lomnem količniku*. Newton je vztrajal pri zamisli, da je svetloba tok zelo



Naslovnica Newtonove Optike. Newton jo je napisal v angleščini, medtem ko je *Principe* napisal v latinščini. Četudi Optika ni dosegla ravni Principov in je v njej Newton zagovarjal stališče, da svetloba sestavlja tok delcev, je izdatno vplivala na razvoj optike.



Risba iz Newtonove Optike kaže razklon Sončeve svetlobe na prizmi.

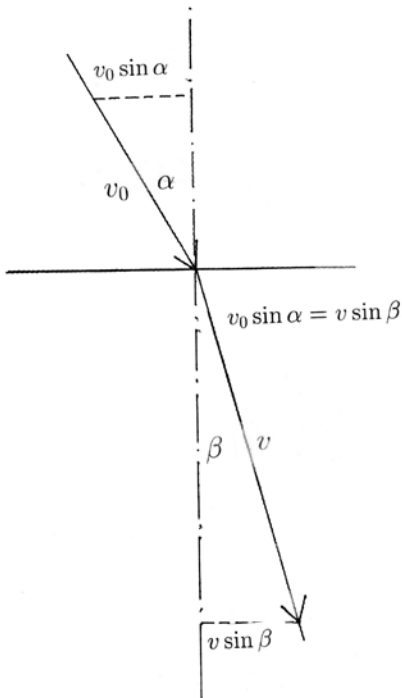
hitrih delcev, *korpuskul*. Mislil je, da se delci mavričnih barv med seboj razlikujejo, denimo po masi.

Boyla in Hooke so pritegnile barve tankih plasti, kakršne opazimo na primer, če na gladini vode plava tanka plast olja. Hooke je pojav pojasnil z delovanjem svetlobe, ki se odbije na spodnji mejni ploskvi, na svetlobo, ki se odbije na zgornji. Pri tem je mislil na valovanje, a o tem ni imel jasne predstave. Kraljeva družba je delo, ki ji ga je predložil Newton, dala v oceno komisiji, katere član je bil Hooke. Hooke je kritiziral nekatere vidike Newtonovega dela. To je izzvalo Newtonovo nejevoljo in grožnjo, da bo nehal raziskovati. V Kraljevi družbi so s težavo zgladili spor. Newton se je odločil, da tedaj predavanj ne bo izdal. Šele po letu 1690 je začel pripravljati gradivo za tisk. Knjiga *Optika ali razprava o odbojih, lomih, upogibanjih in barvah* je izšla leta 1704, leto po Hookovi smrti.

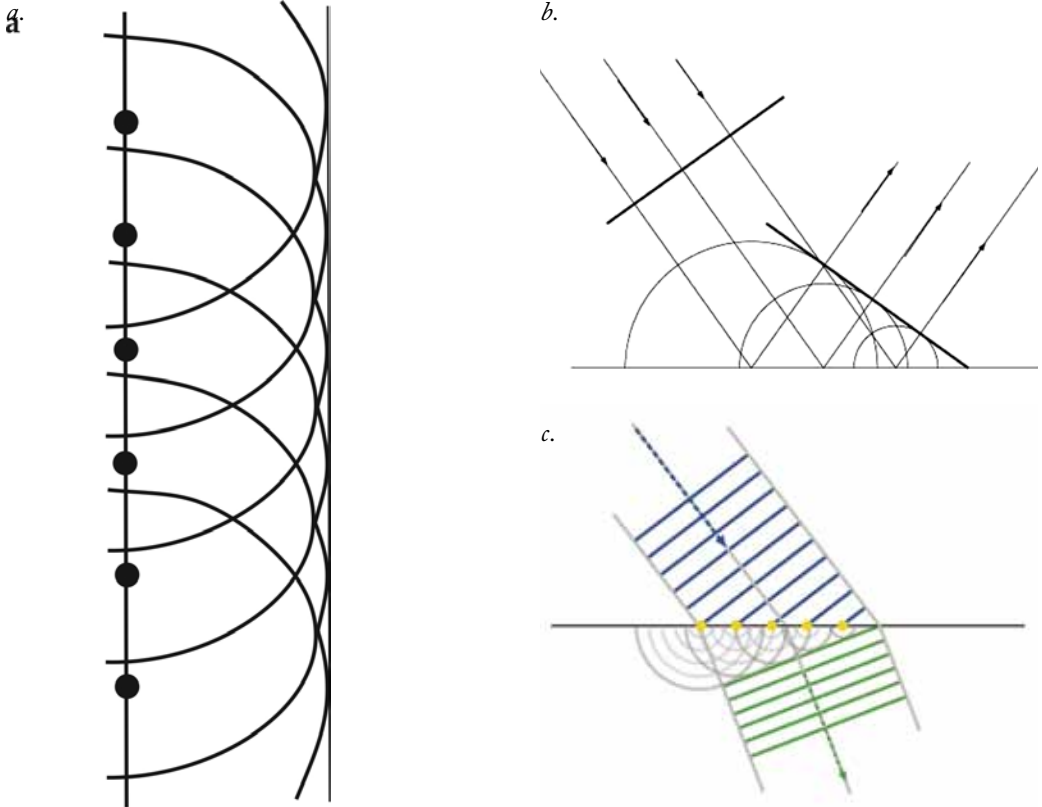
Newton je zapisal: »Moj načrt v tej knjigi ni pojasniti lastnosti svetlobe z domnevmami,

ampak jih predlagati in dokazati z razumom in poskusi.« V prvem delu je opredelil osnovne pojme in pojave ter opisal poskus, pri katerem je belo svetlobo razklonil v spekter. V drugem delu je opisal mavrico in pojasnil njene barve ter obravnaval *Newtonove kolobarje*, ki sta jih pred njim raziskovala Boyle in Hooke. Tretji del je posvetil *upogibanju svetlobnih žarkov in barvam, ki pri tem nastanejo*. Namesto Grimaldijevega imena »uklon« (difrakcija) je uporabljal ime »upogibanje« (infleksija).

Newtonovi zagovorniki so zagovarjali delčno naravo svetlobe in se pri tem sklicevali na mojstrov ugled. S tem so zavrla razvoj misli, da je svetloba valovanje. To mnenje je poleg Hooke, katerega zamisli so bile meglene, zagovarjal Christiaan Huygens. Leta 1678 je o tem poročal pariški akademiji znanosti, leta 1690 pa je izšla njegova *Razprava o svetlobi*. Gradil je na zamisli Renéja Descartesa, da ves prostor izpolnjuje eter in da deli etra delujejo na dele etra, ki se jih dotikajo. Eter si je predstavljal kot zelo rahlo sredstvo z nemerljivo majhno gostoto. V prvi vrsti je mislil na potovanje motenj, *valovnih čel* ali *valovnih front*. Postavil je *Huygensovo načelo*: Vsaka točka valovnega čela je izvir elementarnih valov, novo valovno čelo nastane kot ovojnica elementarnih valov. Z načelom je pojasnil premo potovanje svetlobe ter odboj in lom. Ni se zanimal za časovno odvisnost nihanja delov etra in zato ni zajel uklona in interference. Thomas Young je v prvih letih 19. stoletja svetlobo pojasnil kot periodično valovanje in je zajel tudi uklon in interference. Teorijo je dopolnil Augustin Fresnel leta 1818.



Descartes je privzel, da se pri lomu komponenta hitrosti v smeri meje obrani. Zakon je napovedal, da je razmerje sinusov konstantno, a razmerje hitrosti ni bilo pravo. Zakon sta po merjenjih odkrila Thomas Harriot okoli leta 1601 in Willebrord Snell leta 1621, a ga nista objavila. Za odkritje prvega obstajajo posredna pričevanja. Drugi pa je rokopis razdelil prijateljem, tako da velja za odkritelja lomnega zakona.



S Huygensovim načelo izpeljemo, da svetloba v neomejeni snovi potuje premo (a), da se na ravni oviri odbije po odbojnem zakonu (b) in da se na meji med območjema z različno hitrostjo lomi po lomnem zakonu (c).

Descartes, ki je leta 1637 objavil *lomni zakon*, je mislil, da je hitrost svetlobe v prozorni snovi večja kot v praznem prostoru. Enako je mislil Newton, češ da prozorna snov s silo privlači delce svetlobe. Če se zaradi tega komponenta hitrosti delca pravokotno na mejo prozornega telesa pri prehodu iz praznega prostora poveča, komponenta v smeri meje pa se ne spremeni, dobimo lomni zakon:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{v_0}$$

Pri tem je α vpadni kot, β lomni kot ter v_0 hitrost svetlobe v praznem prostoru in v hitrost svetlobe v prozorni snovi. Poskus

pokaže, da se pri prehodu v snov svetloba lomi proti vpadni pravokotnici. Lomni kot je manjši od vpadnega in hitrost v snovi večja kot hitrost v praznem prostoru.

Po Huygensovem načelu pa dobimo lomni zakon:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_0}{c},$$

če je c_0 hitrost svetlobe v praznem prostoru in c hitrost v snovi. V tem zakonu je hitrost svetlobe v praznem prostoru večja od hitrosti v snovi. Merjenje hitrosti v snovi bi dalo odgovor na vprašanje, kateri zakon je pravi. Šele leta 1851 se je Leon Foucault z

merjenjem prepričal, da je hitrost svetlobe v vodi manjša kot v praznem prostoru (ali na zraku). Vendar so že pred tem opustili zamisel, da je svetloba tok delcev.

Merjenje hitrosti svetlobe. Nekdaj je prevladovalo mnenje, da se svetloba razširi v trenutku in je njena hitrost neskončna. Posamezniki pa so mislili, da je hitrost svetlobe zelo velika, a končna. Galileo Galilei je razmišljal, kako bi jo merili, in ugotovil, da to ni mogoče, ker ni bilo mogoče meriti dovolj kratkih časov. Ole Rømer je opazoval mrke lune Io za Jupitrom. Ugotovil je, da se razmik med zaporednima mrkoma krajša, ko se Zemlja približuje Jupitru, in daljša, ko se od njega oddaljuje. Po tem je leta 1676 spoznal, da je hitrost svetlobe končna. James Bradley je z merjenjem ugotovil, da zvezda v smeri pravokotno na ravnino gibanja Zemlje okoli Sonca na nebu v enem letu opiše krožec, katerega polmer je videl pod kotom 20 sekund. Leta 1729 je to *zvezdno aberacijo* pojasnil s hitrostma Zemlje pri kroženju okoli Sonca 30 kilometrov na sekundo in hitrostjo svetlobe s Sonca v pravokotni smeri. Ugotovil je, da je hitrost svetlobe malo več kot desettisočkrat večja od hitrosti Zemlje, torej malo večja kot 300 tisoč kilometrov na sekundo. Potem je ugotavljanje zelo kratkih časovnih razmikov omogočilo, da se je merjenje hitrosti svetlobe preselilo na Zemljo. Hyppolite Fizeau je leta 1849 izmeril hitrost svetlobe na poti med pariškima gričema v razdalji skoraj devet kilometrov. Curek svetlobe je spustil skozi zobe zobatega kolesa, ki ga je vrtil vse hitreje, dokler ni izginila slika. Tedaj je bil čas, v katerem se je zobnik zavrtel za pol zoba, enak času, ki ga je svetloba potrebovala za pot do zrcala in nazaj. Leon Foucault je leta 1851 izmeril hitrost svetlobe na razdalji treh metrov. Uporabil je zrcalce, ki ga je poganjala zelo hitro se vrteča turbina. V času, v katerem je svetloba dospela do oddaljenega mirujočega zrcala in se vr-

nila do zrcalca, se je zrcalce zasukalo in se je slika premaknila. Tako je ugotovil, da je hitrost svetlobe v praznem prostoru (zraku) 300 tisoč kilometrov na sekundo, v vodi pa le 225 tisoč kilometrov na sekundo. Potem so hitrost svetlobe v praznem prostoru merili vse natančneje in naposled leta 1983 z dogovorom postavili hitrost $c_0 = 299.792.458$ metrov na sekundo. Na podlagi tega dogovora je določen tudi meter kot razdalja, ki jo svetloba v praznem prostoru prepotuje v času $1/299792458$ sekunde.

Valovna slika je povezala barve z valovno dolžino:

- vijolično barvo z valovno dolžino 380 do 450 nm,
- modro barvo z valovno dolžino 459 do 495 nm,
- zeleno barvo z valovno dolžino 495 do 570 nm,
- rumeno barvo z valovno dolžino 570 do 590 nm,
- oranžno barvo z valovno dolžino 590 do 620 nm,
- rdečo barvo z valovno dolžino 620 do 750 nm.
- Nanometer, nm, je milijonina milimetra ali milijardina metra.

Razmerje hitrosti svetlobe v praznem prostoru in hitrosti v snovi vpeljemo kot *lomni količnik snovi* $n = c_0 / c$. Zrak ima lomni količnik 1,0003, voda 1,33, kronska steklo 1,52, flintska steklo 1,65, diamant 2,42. Pri natančnih podatkih je treba navesti valovno dolžino in temperaturo. Voda ima pri valovni dolžini 400 nm lomni količnik 1,345 in meri hitrost svetlobe v njej 223 tisoč km/s, pri valovni dolžini 700 nm pa lomni količnik 1,331 in meri hitrost svetlobe v njej 225 tisoč km/s. Borosilikatno steklo ima pri valovni dolžini 434 nm lomni količnik 1,521 in meri hitrost svetlobe v njem 197 tisoč km/s, pri valovni dolžini 640 nm pa lomni količnik 1,509 in meri hitrost svetlobe v njem 198 tisoč km/s. Podatki so odvi-

sni od natančnosti pri merjenju. V različnih tablicah najdemo podatke, ki se med seboj malo razlikujejo. Navedeni veljajo za sobno temperaturo. Opazimo, da ima pri svetlobi v prozornih snoveh valovanje z večjo valovno dolžino večjo hitrost. To je *normalna disperzija*.

Valovna dolžina v praznem prostoru λ_0 je povezana s frekvenco ν takole: $\lambda_0 \nu = c_0$, in v prozorni snovi takole: $\lambda \nu = c$. Pri tem smo upoštevali, da se frekvenca pri prehodu iz praznega prostora v prozorno snov ne spremeni. Valovna dolžina v prozorni snovi $\lambda = \lambda_0 c / c_0 = \lambda_0 / n$ je krajša kot valovna dolžina v praznem prostoru.

V praznem prostoru potujejo sestavine valovanja z različnimi valovnimi dolžinami z enako hitrostjo. V prozorni snovi pa potujejo sestavine z različno valovno dolžino z različnimi hitrostmi. To ima daljnosežne posledice. Valovanje ima dano valovno dolžino in dano frekvenco samo, če traja neomejeno časa. V valovanju, ki traja končen čas, se pojavijo sestavine z malo manjšimi in malo večjimi frekvencami od frekvence, ki jo oddaja izvir. Čim krajši čas traja valovanje, tem širši pas frekvenc je zastopan v valovanju. Hitrost, ki ustreza frekvenci izvira, tako imenovana *fazna hitrost*, se pojavi v enačbi za valovanje in je ne moremo izmeriti. Če hočemo izmeriti hitrost, se mora valovanje začeti (in končati). Zaradi tega se v valovanju pojavijo sestavine z malo manjšo in malo večjo frekvenco, torej sestavine z malo večjo in malo manjšo valovno dolžino in z malo večjo in malo manjšo hitrostjo. V skupini valov z manjšo in večjo valovno dolžino potujejo valovi z večjo valovno dolžino hitreje kot valovi z manjšo valovno dolžino. Na čelu skupine se nakopičijo valovi z večjo hitrostjo, torej z večjo valovno dolžino, na začetju skupine pa valovi z manjšo hitrostjo, torej z manjšo valovno dolžino. Skupina valov se razleže. Težišče skupine potuje s *skupinsko* ali *grupno hitrostjo*, ki se v snovi - ne pa v praznem prostoru - razlikuje od fazne hitrosti. Pri normalni disperziji je skupinska

hitrost manjša od fazne hitrosti. Pri *anomalni disperziji*, pri kateri sestavine z manjšo valovno dolžino potujejo z večjo hitrostjo, pa je obratno in skupinska hitrost lahko preseže hitrost svetlobe v praznem prostoru. Anomalna disperzija pa je vselej povezana z absorpcijo. Skupina valov s potovanjem slabi. Pomiri izjava, da sporočila - enako kot delci in energija - ne morejo potovati hitreje kot svetloba v praznem prostoru. Pri tem moramo upoštevati vse lastnosti svetlobe in možnosti za merjenje.

Disperzijo opazimo tudi pri valovih na gladini globoke vode. Tudi v tem primeru valovi z večjo valovno dolžino potujejo hitreje kot valovi z manjšo. V skupini valov se na čelu skupine naberejo sestavine z večjo valovno dolžino in na začetju sestavine z manjšo valovno dolžino. To je mogoče opazovati na morju.

Literatura:

Strnad, J., 1995: *Fiziki. Trinajst portretov. Ljubljana: Mibelac in Neškovič.*