

# PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 14 (1986/1987)

Številka 4

Strani 194-199

Janez Strnad:

## O NARAVI SVETLOBE IN O LOMU

Ključne besede: fizika, svetloba.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/14/849-Strnad.pdf>

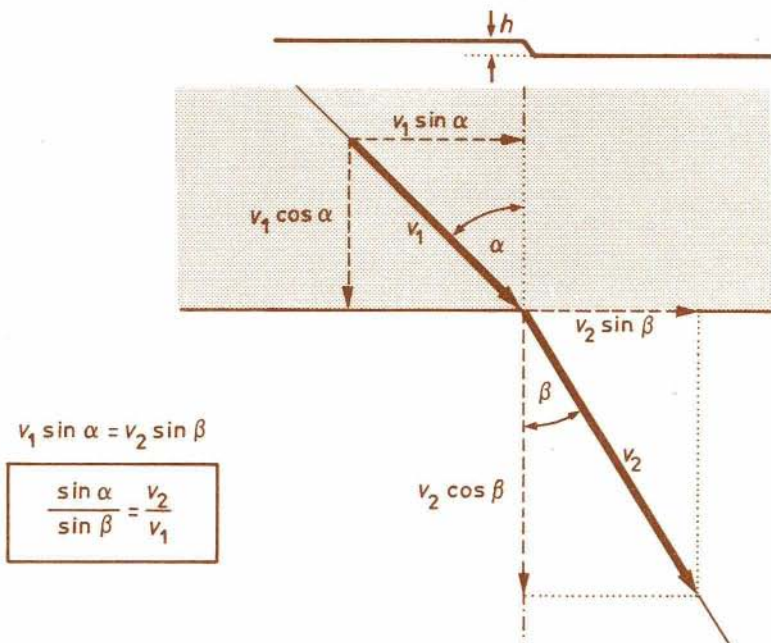
© 1987 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

## O NARAVI SVETLOBE IN O LOMU

Svetloba potuje po praznem prostoru v ravni črti s hitrostjo malo manj kot 300 000 kilometrov na sekundo. To je največja hitrost, ki jo lahko dosežejo delci, energija in sporočila. V prvi polovici 17. stoletja je bil Rene Descartes prepričan, da se svetloba razširi v hipu in je njena hitrost neskončna, medtem ko je Galileo Galilei zagotavljal, da je končna. Nobeden od njiju pa svojih trditvev ni mogel podpreti z merjenji. Prvi je določil hitrost svetlobe leta 1676 Ole Römer z opazovanjem mrkov Jupitrove lune, ki so si sledili v daljših razmikih,



Slika 1. Prehod kroglice preko klanca, pri katerem dobimo lom kot pri prehodu svetlobe iz zraka v vodo. Hitrost kroglice pred prehodom meri  $v_1 = 0,5$  m/s, po prehodu pa  $v_2 = 0,67$  m/s. (Če se kroglica ne kotali, ampak drsi, velja  $(1/2)mv_2^2 = (1/2)mv_1^2 + mgh$  in je klanec visok  $h = 1$  cm, če pa se kotali, velja  $(7/5) \cdot (1/2)mv_2^2 = (7/5) \cdot (1/2)mv_1^2 + mgh$  in je klanec visok  $h = 1,4$  cm. Pri tem je  $m$  masa kroglice.) Pri vpadnem kotu  $\alpha = 45^\circ$  meri lomni kot  $\beta = 32^\circ$ . Ker se prečna komponenta hitrosti ne spremeni, velja  $v_1 \sin \alpha = v_2 \sin \beta$  in zapišemo *lomni zakon* v obliki  $\sin \alpha / \sin \beta = v_2 / v_1$ .

ko se Zemlja oddaljuje od Jupitra, in v krajših, ko se mu približuje. Za hitrost svetlobe je dobil okoli 222 000 kilometrov na sekundo.

Tedaj so oživila vprašanja o naravi svetlobe. Ali jo sestavljajo delci, ki potujejo od svetila na vse strani? Ali gre za nekakšne periodične motnje, ki jim dandanes pravimo valovanje? Prvo je mislil Isaac Newton, drugo pa Christian Huygens. Newton svojega mnenja ni vsiljeval drugim, toda njegovi pristaši niso dopuščali druge razlage. Tako je zaradi Newtonovega ugleda do prve polovice 19. stoletja prevladovala delčna teorija svetlobe. Po premem širjenju v praznem prostoru se ni bilo mogoče odločiti ne za eno ne za drugo. Na začetku 19. stoletja pa so se začeli množiti namigi, da svetlobe ne sestavljajo delci. Toda trajalo je precej časa, preden se je to spoznanje uveljavilo.

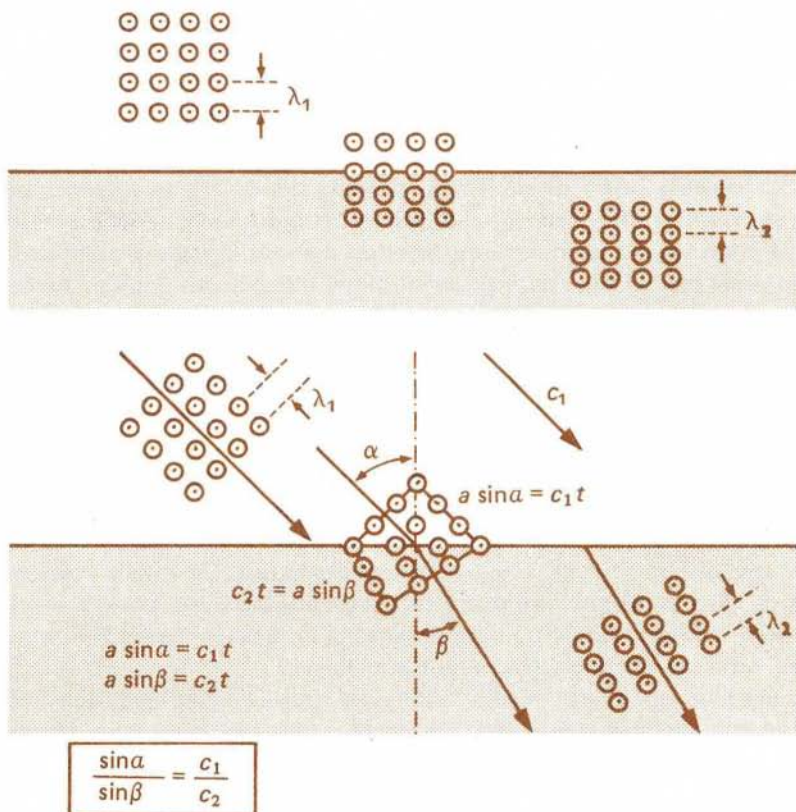
Na prehodu od delčne teorije k valovni je imel pomembno vlogo *lom*, kakor imenujemo pojav, da svetloba na prehodu iz snovi v snov spremeni smer. Zagotovo ste že videli, kako je palica, katere del sega v vodo, navidez zlomljena. Tukaj potrebujemo samo podatek, da se pri prehodu iz zraka v vodo svetloba lomi proti pravokotnici na mejo med obema območjema. Pojav so spočetka pojasnili z obema predstavama o svetlobi.

Pri prvi mislimo na kroglico, ki se kotali po vodoravni podlagi. Ko preide čez nizek klanec, se kotali po nižjem delu vodoravne podlage z večjo hitrostjo. Na klancu se pospeši le v vzdolžni smeri, ne v prečni. Zato zavije proti pravokotnici na meji obeh območij (slika 1).

Pri drugi predstavi mislimo na četo, ki po cesti zavije na njivo. Brž ko mož v njej prekorači mejo, začne korakati počasneje. Če koraka četa pravokotno na mejo z njivo, se njena smer ne spremeni. Spremeni se samo razmik med vrstama: tem bolj se zmanjša, čim bolj se zmanjša hitrost. Če koraka poševno na mejo z njivo, pa se spremeni smer. Mož, ki gre prvi čez mejo, se mora nekoliko zasukati, če naj ostane vrsta poravnana (slika 2). Smer se tudi v tem primeru zlomi proti pravokotnici na mejo obeh območij.

Svetloba je vsekakor mnogo hitrejša od kroglice in od korakajočih mož. Oboje smo uporabili le kot nekakšen *model*, da smo lažje razpravljali. Ugotovili smo, da lahko lom pojasnimo z različno hitrostjo tostran meje in onstran nje. Toda pri valovanju je hitrost onstran meje manjša kot tostran, pri delcih pa večja, če se svetloba lomi proti pravokotnici na mejo. Povedali smo že, da se pri prehodu iz zraka v vodo svetloba lomi proti pravokotnici. Treba je torej izmeriti njeno hitrost v vodi. Hitrost v zraku je približno enaka kot v praznem prostoru. Če je hitrost svetlobe v vodi večja kot v praznem prostoru, zmaga delčna teorija, če pa je manjša, zmaga valovna teorija. To sta vedela že Newton in Huygens, le da s tedanjimi napravami ni bilo mogoče meriti v laboratoriju ne hitrosti svetlobe v zraku ne v vodi.

Okoli leta 1840 je Dominique Francois Jean Arago opoziril na to ugotovitev svoja učenca Armanda Hippolyta Louisa Fizeauja in Jeana Bernarda Leona Foucaulta. Prijateljta sta bila rojena leta 1819 in sta delala v fiziki, ne da bi si z njo služila kruh. Toda še preden sta se lotila naloge, sta se sprla in nadaljevala raziskovanje vsak po svoji poti.



Slika 2. Prehod čete s ceste na njivo, pri katerem dobimo lom kot pri prehodu svetlobe iz zraka v vodo. Četa koraka na cesti s hitrostjo  $c_1 = 4$  km/h, na njivi pa s hitrostjo  $c_2 = 3$  km/h. Pri prehodu v smeri pravokotnice na mejo se smer čete ne spremeni, pač pa se v razmerju hitrosti pomanjša razmik med vrstami (zgoraj):  $\lambda_1 / \lambda_2 = c_1 / c_2$ . Razmik med vrstami ustreza krajevni periodi, se pravi valovni dolžini pri valovanju. Pri prehodu pod vpadnim kotom  $\alpha = 45^\circ$  se četi spremeni smer, tako da meri lomni kot  $\beta = 32^\circ$  (spodaj). Desni in levi bok potrebujeta za prehod čez mejo enak čas  $t$ , tako da velja  $a \sin \alpha = c_1 t$  in  $a \sin \beta = c_2 t$  in zapišemo lomni zakon v obliki  $\sin \alpha / \sin \beta = c_1 / c_2$ .

Prvi del naloge je rešil Fizeau leta 1849: uspelo mu je izmeriti hitrost svetlobe v zraku. Uspeh pa je bil samo polovičen: ni mogel meriti v laboratoriju in način zato ni bil uporaben za merjenje svetlobe hitrosti v vodi. Meril je med pariškima gričema Montmartre in Suresnes v razdalji 8,6 kilometra. Curek svetlobe iz močne svetilke je zbral z lečo in ga usmeril na zrcalo na drugem griču, da se je vrnil na prvega. Curek je tekel skozi zobe zobatega kolesa. Kolo je začel vrteti z vse večjim številom vrtljajev in pri določenem številu vrtljajev na sekundo kolo ni več prepuščalo svetlobe. Za pot do drugega griča in nazaj je svetloba porabila tolikšen čas kot kolo, da se je zasukalo za polovico kota med sosednjima zobema. Svetloba je na poti tja šla skozi presledek med zobema, na poti nazaj pa je zadela zob (slika 3). Kratek račun je dal za hitrost svetlobe 313 000 kilometrov na sekundo.

Foucault si je dal več časa, zato pa je dosegel končni uspeh. S svojim načinom je lahko izmeril hitrost svetlobe na poti nekaj metrov. To je lahko naredil v vodi. Zrcalce je poganjala majhna parna turbina na isti osi s 600 vrtljaji v sekundi. Mirojoče zrcalce je poslalo curek svetlobe iz reže na zrcalo, da se je odbil sam vase in nazaj v režo. Ko se je zrcalce zelo hitro vrtelo, se je v času, ki ga je porabila svetloba za pot do zrcala in nazaj, tako zasukalo, da je nastala slika reže v določeni razdalji od reže. Po tej razdalji in podatkih o oddaljenosti



Slika 3. Bistvo Fizeaujevega načina merjenja po stari risbi. Ob očesu je polprepustna ploščica, to je delno posrebreno zrcalo, ki prepusti približno polovico vpadne svetlobe. Zobato kolo z  $n$  zobmi se vrti s frekvenco  $\nu = 1/t_0$ , pri tem je  $t_0$  čas enega vrtljaja, ko ne vidimo slike svetila. Tedaj je čas  $t = t_0/2n = 1/2n\nu$ , v katerem se zavrti kolo za polovico razmika med zobema, enak času potovanja svetlobe od zobatega kolesa do zrcala v razdalji  $l$  in nazaj:  $t = 2l/c$ . Oboje izenačimo in dobimo  $1/2n\nu = 2l/c$  in nazadnje

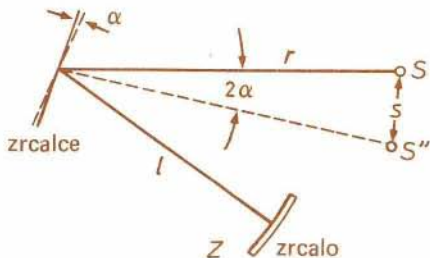
$$c = 4nl\nu$$

Pri kolesu z  $n = 720$  zobmi je Fizeau nameril razdaljo  $l = 8,633$  km in frekvenco kolesa  $\nu = 12,6 \text{ s}^{-1}$ . Iz tega je izračunal hitrost svetlobe v zraku  $c = 4.720.8.633 \text{ km} \cdot 12,6 \text{ s}^{-1} = 313\,000 \text{ km/s}$ .

Slika 4. Foucaultov način merjenja. V ponostavljeni risbi (desno) se svetloba iz svetila S odbija na zrcalcu do krogelnega zrcala Z in nazaj do mirujočega zrcala (črtkano) ter se vrne do svetila. Ko je zrcalce ob povratku zasukanano (sklenjeno), nastane premaknjena slika svetila S''. Razdaljo  $s = 2ra$  svetila S in slike S'' določa kot  $\alpha$ , za katerega se zasučje zrcalce v času potovanja svetlobe od zrcalca do zrcala Z v razdalji  $l$  in nazaj:  $t = 2l/c$ . Velja  $\alpha = 2\pi\nu t$  in  $s = 2r \cdot 2\pi\nu \cdot 2l/c$  in nazadnje

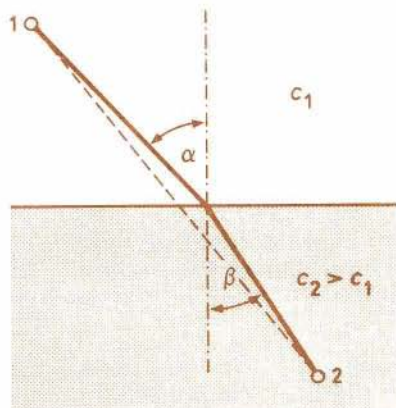
$$c = 8\pi\nu r l / s$$

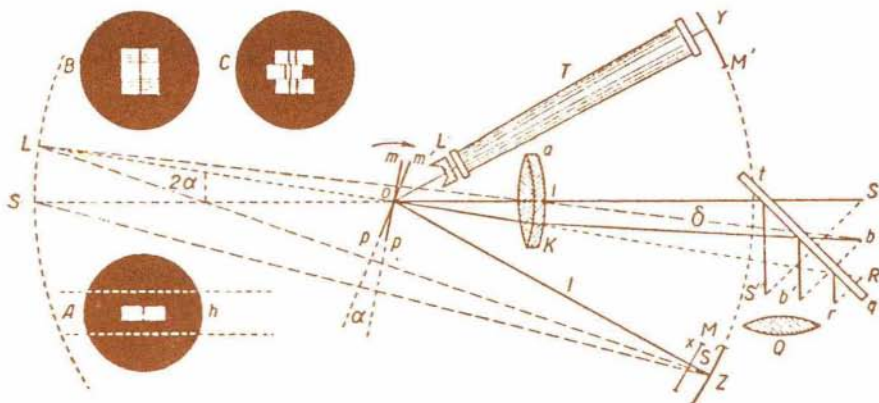
Foucault je pri frekvenci zrcala  $\nu = 800 \text{ s}^{-1}$  in razdaljah  $l = 4 \text{ m}$  in  $r = 2,515 \text{ m}$  nameril  $s = 0,7 \text{ mm}$ . Iz tega je dobil za hitrost svetlobe v zraku  $c = 8\pi \cdot 800 \text{ s}^{-1} \cdot 2,515 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} / 7 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 289\,000 \text{ km/s}$ . Naprava je bila v resnici precej bolj zapletena (desno). Z njo je lahko naravnost primerjal hitrost svetlobe v zraku  $c$  s hitrostjo v vodi  $c'$ . Poleg polprepustne ploščice tq, leče aK



in lupe Q sta dodana cev z vodo T in krogelno zrcalo Y, simetrično glede na zrcalo Z. Z nitko pred svetilom in zaslonkami je dosegel, da sta sliki po odboju na zrcalu Z ob mirujočem zrcalu (A) obdajali šibkejši zelenkasti sliki po odboju na zrcalu Y (B). Ko se je zrcalce hitro vrtelo, sta se robni sliki premaknili za  $s' = 8\pi\nu r l / c'$ , srednja pa za  $s = 8\pi\nu r l / c$ . Premika  $s'$  in  $s$  sta bila približno v razmerju 4/3, iz česar je sledilo za razmerje hitrosti v vodi in v zraku  $c'/c = 3/4$ .

**Fermatovo načelo.** Z lomom je povezana neka presenetljiva lastnost valovanja. Točko 1 na eni strani meje dveh območij in točko 2 na drugi strani povežimo z lomljeno črto, po kateri potuje svetloba iz ene točke v drugo. Pokaže se, da pride svetloba iz točke v točko natanko po najkrajšem času. Pri tem velja lomni zakon  $\sin\alpha / \sin\beta = c_1 / c_2$ . Po zveznici (črtkano), ki je sicer n najkrajša razdalja obeh točk, bi bila pot z večjo hitrostjo krajša, a pot z manjšo hitrostjo daljša in bi potovanje trajalo dalj časa.





zrcalca od zrcala in od zaslona z režo je bilo mogoče izračunati hitrost svetlobe (slika 4). Foucault je dobil za hitrost svetlobe v zraku 298 000 kilometrov na sekundo in za hitrost svetlobe v vodi v cevi 221 000 kilometrov na sekundo. Hitrost svetlobe v vodi meri torej le 3/4 hitrosti svetlobe v zraku ali v praznem prostoru.

Hitrost svetlobe v prozorni snovi je manjša kot v praznem prostoru. Izid Foucaultovega merjenja je utrdil prepričanje, da je svetloba valovanje. Poskuse, ki s svojim izidom ovržejo eno izmed dveh nasprotujočih si teorij, imenujejo odločilne ali s tujo besedo *krucialne*. Toda tudi s pomenom takih poskusov ne gre pretiravati. Celotno izid Foucaultovega merjenja bi lahko pojasnili z delčno teorijo, če bi jo prilagodili. Za delce pri prehodu čez mejo območij pač ne bi veljale enačbe, ki smo jih uporabili za kroglico na klancu. Svetlobo so imeli poslej sicer za valovanje, a vprašanje o njeni naravi je ostalo nerešeno do leta 1865, ko je James Clerk Maxwell ugotovil, da je *elektromagnetno valovanje*. Periodične spremembe, o katerih smo govorili, zadevajo električno in magnetno polje, pravokotno na smer potovanja valovanja. Vprašanje se je tedaj zdelo rešeno.

Toda v fiziki ni nobeno vprašanje rešeno dokončno. Vprašanje o naravi svetlobe se je odprlo ponovno po letu 1900, ko se je pokazalo, da je energija v elektromagnetnem valovanju razdrobljena na obroke, vsaj ko jo izmenjuje z elektroni in drugimi delci iz sveta atomov. Čeprav imajo ti obroki – *kvanti* ali *fotoni* – nekatere lastnosti delcev, pa v njih nikakor ne smemo videti potomcev Newtonovih svetlobnih delcev. Kljub temu je vprašanje o delčni ali valovni naravi svetlobe v našem stoletju ponovno stopilo na plan, le da v novi preobleki in na drugi ravni.

Janez Strnad

DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SRS LETNIK 14, 1986-87

# PRESEK

4

