

# **PRESEK**

**List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje**

ISSN 0351-6652

Letnik **17** (1989/1990)

Številka 1

Strani 24-30

Marija Vencelj:

## **GLEJ, MAVRICA!, 1. DEL. PLES IN RAZCVET SONČNEGA ŽARKA V DEŽNI KAPLJICI**

Ključne besede: matematika, analiza, fizika, dežna mavrica, lom, odboj.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/17/966-Vencelj.pdf>

© 1989 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.

## GLEJ, MAVRICA!

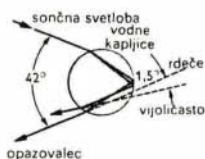
### 1. del

#### Ples in razcvet sončnega žarka v dežni kapljici

Lok dežne mavrice je znamenje zaveze, da voda ne bo nikoli več uničila zemlje. To znamenje je po vesoljnem potopu bog postavil v oblake, ker je bila njegova jeza potolažena. Ta kratko povzeta oznaka iz Geneze, prve Mojzesove knjige Stare zaveze, je bolj razlaga tedanjega človekovega odnosa do boga, kot pa opis tega prelepega vremenskega pojava. Vendar zadene bistvo občutka, ki nas prevzame ob pogledu na mavrico – spokojen mir, v katerem ni mesta za jezo in maščevanje.

Mavrica je most med dvema kulturama: poezijo in znanostjo. Pradaven je trud pesnikov in naravoslovcev, da bi jo primerno opisali. Pri tem so nekateri celo odklonilno sprejemali poskuse in uspehe znanstvene razlage. Znano je, da je Goethe za Newtonovo analizo mavričnih barv zapisal, da je, kot da bi "naravi pohabil dušo". Drugačno mišljenje pa povejmo z Descartesovimi besedami: "Mavrica je tak izreden čudež narave, ... da bi težko izbral primernejši zgled za uporabo svoje metode."

Kaj torej je mavrica? Zakaj nastane? Če dežuje in hkrati sije sonce, lahko pričakujemo, da bomo na nebu zagledali njen lok, če bodo okoliščine ugodne – celo dva. Pri tem je ni treba iskati po vsem nebesnem svodu, nahaja se na natanko določenem mestu. Leksikon Cankarjeve založbe Fizika nas o tem pouči takole:



**mavrica:**  
dvakratni lom in  
popolni odboj žarka  
v dežni kapljici pri  
poenostavljeni  
razlagi

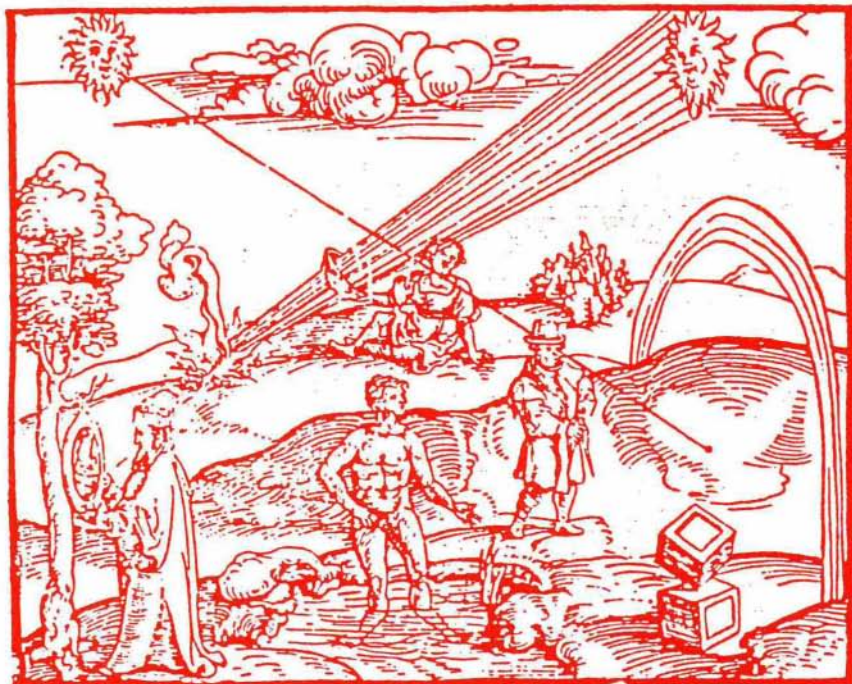
**mavrica**, spekter sončne svetlobe, ki nastane zaradi disperzije in uklona sončne svetlobe na okroglih vodnih kapljicah v ozračju, ko je Sonce za hrbtom opazovalca. V *glavni mavrici* (pri kotu ok.  $42^\circ$ ) so razvrščene barve: vijoličasta, modra, zelena, rumena, oranžna, rdeča; na zunanjem robu se navadno pojavi še *stranska mavrica* (52) z barvami v obrnjenem redu.

Ta razlaga seveda zbuja naše zanimanje. Zakaj se zaradi sipanja sončne svetlobe na dežnih kapljicah prav na določenem delu neba pojavi barvni lok?

Zmotna je predpostavka, da je to le preprost problem geometrijske optike, ki so ga že davno rešili. Teorijo mavrice so zadovoljivo razvili šele v nekaj zadnjih letih. Poleg teorije geometrijske optike upošteva ta teorija vse znane

lastnosti svetlobe, kot so na primer interferenca, uklon in polarizacija.

Marsikateri fizikalni inštrument so razvili s posebnim namenom, da bi z njim raziskali dežno mavrico in sorodne pojave. Mavrica je bila preskusni kamen za testiranje različnih optičnih teorij. Z najuspešnejšimi med njimi je dandanes moč mavrico ustrezno matematično opisati, to je napovedati porazdelitev svetlobe na nebu.



Slika 1. Vitellov lesorez. Optični pojavi, kot jih je ilustriral poljski menih Vitello. Lesorez je iz 1535. izdaje njegove knjige o optiki, ki jo je napisal leta 1270. Na njem je mavrica zelo opazna.

Če se v pršici slapu ali na nebu po plohi pojavi en sam širok mavrični lok, je to lok *glavne mavrice*. Njena intenzivnost in širina sta lahko različni, toda barve si slede vedno v istem zaporedju: od vijolične na notranjem robu preko modre, zelene, rumene in oranžne do rdeče na zunanjem robu.

Drugi mavrični pojavi so šibkejši in jih ne opazimo vedno. Više na nebu nad glavno mavrico se lahko pojavi še *stranska mavrica*, v kateri se vrste barve v

obratnem vrstnem redu kot v glavni mavrici – od rdeče, v notranjosti, do vijolične, na zunanjem robu. Če boste pri opazovanju dvojne mavrice dovolj pozorni, boste ugotovili, da je področje med obema mavričnima lokoma nekoliko temnejše kot okoliško nebo. Ta pojav je prisoten celo, če stranska mavrica ni vidna; glavna mavrica ima tedaj svetlejšo in temnejšo stran. Temno področje nad lokom glavne mavrice se imenuje *Aleksandrov temni pas* po grškem filozofu Aleksandru iz Afrodisia, ki je pojav prvi opisal pred več kot dva tisoč leti.

Bolj poredko lahko opazimo še dodatni pojav: gre za zaporedje nejasnih lokov, ki leže na notranji strani glavne mavrice in so izmenično rožnati in zeleni. Še redkeje se taki loki pojavijo na zunanji strani stranske mavrice. Oboji so jasneje vidni v bližini vrha mavričnega loka. Pozornost, ki so jo zbudili, je imela velik vpliv na razvoj teorije mavrice.

— — — — —

Povzeti vso znano teorijo mavrice je za nas prehud zalogaj. Zato se bomo omejili le na njeno *osnovno analizo*, ki temelji na *odboju* in *lomu* sončnega žarka na dežni kapljici. V tej številki Preseka bomo navedli oziroma ponovili potrebne fizikalne zakone in nato opisali, kaj se dogaja s svetlobnim žarkom, ko zadene ob vodno kapljico. Dobljeni rezultati bodo izhodišče za nadaljnja razmišljanja o mavrici v prihodnji številki.

### Odboj in lom.

Površje dežne kapljice, ki lebdi v oblaku, je meja med dvema snovema: zrakom in vodo. Del svetlobe, ki pade nanjo, se odbije, del mejo prestopi. Za odbito svetlobo velja *odbojni zakon*:

*Odbiti žarek leži v ravnini, ki jo določata vpadni žarek in pravokotnica na mejno ploskev v vpadni točki. Pri tem sta kota med pravokotnico in vpadnim oziroma med pravokotnico in odbitim žarkom enaka.*

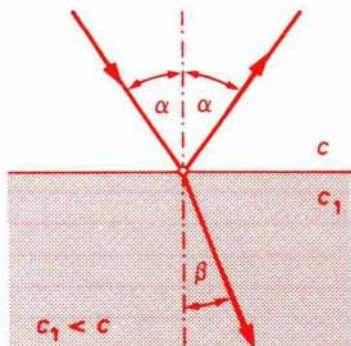
Pri prehodu svetlobe čez mejo dveh snovi, v katerih se svetloba širi z različnima hitrostma  $c$  in  $c_1$ , se svetloba *lomi*. Pri tem velja *lomni zakon*:

*Vpadni in lomljeni žarek ter pravokotnica na mejno ploskev v vpadni točki leže v isti ravnini. Za vpadni kot  $\alpha$  in lomni kot  $\beta$ , ki ju merimo od pravokotnice do žarkov, velja enakost*

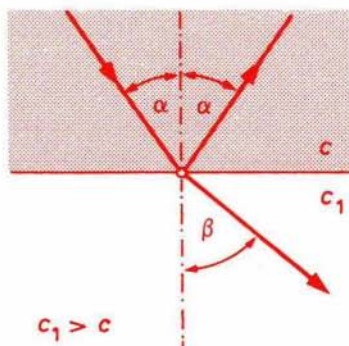
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{c_1} \quad (1)$$

Hitrost svetlobe v vodi je manjša od hitrosti svetlobe v zraku. Pravimo, da je

voda optično gostejša od zraka. Iz enačbe (1) sledi, da je pri prehodu iz optično redkejšje snovi v optično gostejšo snov  $\beta < \alpha$ , torej se svetloba lomi proti vpadni pravokotnici, pri prehodu v obratni smeri pa stran od nje. Oba primera sta hkrati z odbojem ilustrirana na slikah 2 in 3.

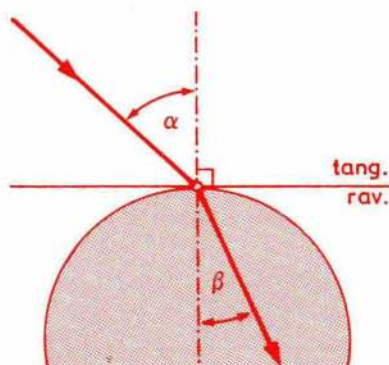


Slika 2



Slika 3

Na obeh slikah je mejna ploskev ravnina. Če mejna ploskev ni taka, je treba vzeti tangentno ravnino, to je ravnino, ki se je dotika v vpadni točki (slika 4).



Slika 4

Povejmo, da je kvocient na desni strani enačbe (1) za prehod svetlobe iz zraka v vodo enak približno  $4/3$ .

Skica na sliki 3 nas opozori še na nekaj. Ko večamo kot  $\alpha$ , se večja tudi kot  $\beta$ . Ker je pri prehodu iz optično gostejše snovi v optično redkejšjo snov  $\beta > \alpha$ , obstaja tak kot  $\alpha < 90^\circ$ , pri katerem je  $\beta = 90^\circ$ . Za vpadne kote, večje od tega

kota, svetloba ne prehaja več čez mejo obeh snovi, ampak se vse odbije. Pravimo, da pride do *totalnega odboja*. Izračunajmo iz enačbe (1) mejni kot totalnega odboja za prehod svetlobe iz vode v zrak. Imamo

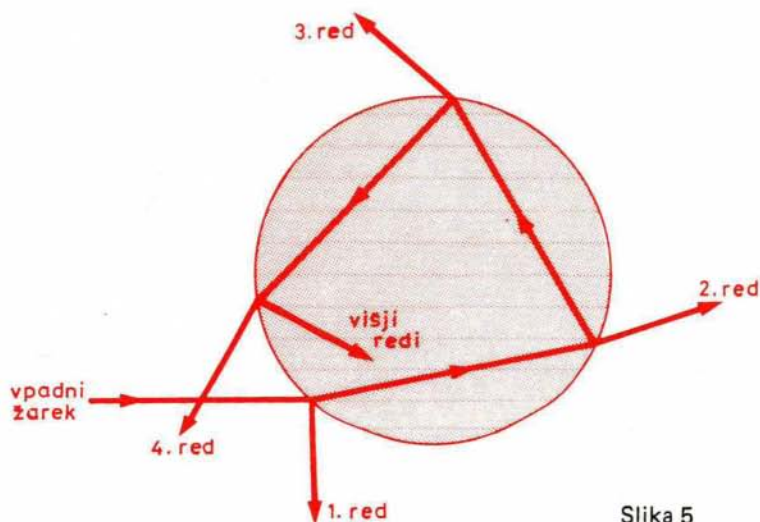
$$\frac{\sin \alpha}{\sin 90^{\circ}} = \sin \alpha = \frac{3}{4}$$

kar da  $\alpha = 49^{\circ}$ .

### Ples sončnega žarka v dežni kapljici.

Poskusimo sedaj ugotoviti, kako se odbija in lomi svetloba, ki v zraku naleti na dežno kapljico. Predpostavili bomo, da ima kapljica obliko majhne kroglice. Žarek, ki zadene njeno površino, se delno odbije, delno lomi. Lomljeni žarek potuje skozi kapljico do nasprotne stene, kjer se spet delno odbije, del pa lomljen zapusti kapljico, itd.

Ker potekajo vse pravokotnice na krogelno površino skozi središče krogle, leži prvi par lomljenega in odbitega žarka zaradi odbojnega oziroma lomnega zakona v ravnini, ki jo določata vpadni žarek in središče krogle. Drugi par takih žarkov leži v ravnini prvega lomljenega žarka in središča krogle. Ta ravnina seveda sovпада s prvo. Če tako nadaljujemo, ugotovimo, da leže poti vseh žarkov, ki izvirajo iz istega vpadnega žarka, v isti ravnini. To je ravnina, ki jo dolo-



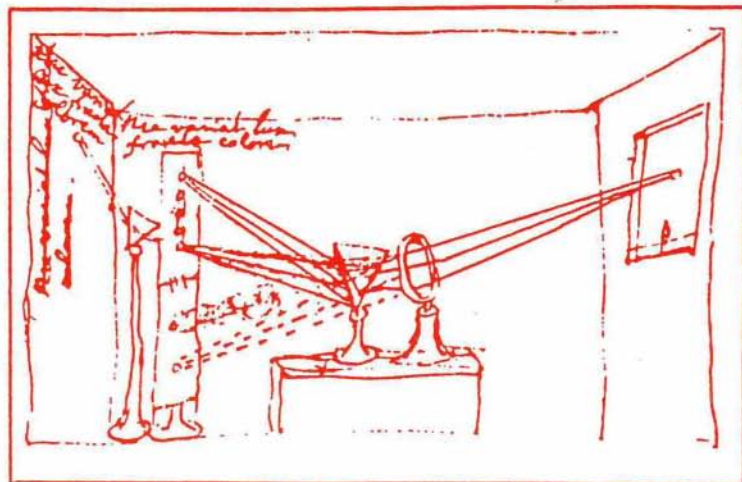
Slika 5

čata vpadni žarek in središče kroglice, torej ravnina nekega glavnega krogelnega kroga. (Ta ravnina ni določena, če žarek pravokotno zadene površino kapljice. Tedaj gre svetloba naravnost skozi kapljico in se odbije v smeri vpadnega žarka.) Zasedovanje svetlobe skozi kapljico je torej ravninski problem. Na sliki 5 imamo narisani tak prerez skozi središče kapljice, v katerem leži opazovani vpadni žarek.

Prvi odbiti žarek bomo imenovali žarek 1. reda. Preostala svetloba lomljena prodre v kapljico. Na nasprotni steni je del izstopi kot žarek 2. reda, del se je odbije nazaj v kapljico. Ko ta del spet zadene steno kapljice, delno prodre ven kot žarek 3. reda, delno pa nadaljuje pot znotraj kapljice kot odbiti žarek. Tako se proces nadaljuje. Kapljica je torej izvor žarkov različnih redov, ki so čedalje šibkejši. Prvi red predstavlja svetlobo, ki se od kapljice direktno odbije, drugi svetlobo, ki gre direktno skozi. Žarki *tretjega reda* zapuste kapljico po enem notranjem odboju in *nam dajejo glavno mavrico*. Žarki 4. reda opravijo dva notranja odboja in *so izvor stranske mavrice*. Obstajajo tudi mavrice višjih redov, ki jih tvorijo žarki, katerih pot je še večkrat odbita, toda praviloma niso vidne.

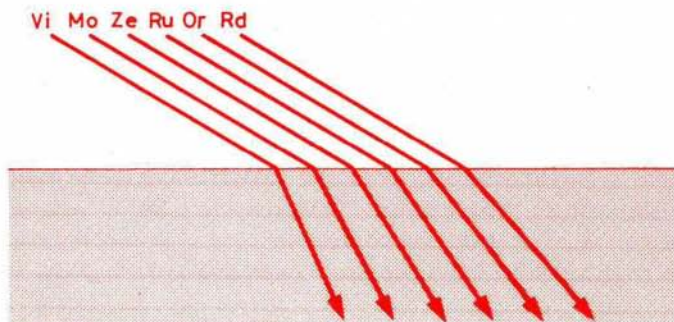
#### Razcvet sončnega žarka v vodni kapljici.

Doslej še nismo spregovorili niti besede o najopaznejši lastnosti mavrice — njenih *barvah*. Zakaj pravzaprav gre, je leta 1666 razložil Newton s svojim slavnim poskusom prehoda svetlobe skozi tristrano prizmo (slika 6). Pokazal je, da



Slika 6. Newtonova lastnoročna risba poskusa s tristrano prizmo.

je bela svetloba mešanica mavričnih barv: *vijolične, modre, zelene, rumene, oranžne in rdeče* in da se vsaka teh barv nekoliko drugače lomi. Pri istem vpadnem kotu imajo različne barve rahlo različne lomne kote. Posledica tega je, da se vzporeden curek bele svetlobe *razkloni*. Pri tem je najmanj odklonjena rdeča, najbolj vijolična sestavina. Pojav sam imenujemo *disperzija*. Na sliki 7 je prikazan za vsako enobarvno komponento svetlobe posebej.



Slika 7

Pri dežni kapljici se žarki vseh redov, razen prvega, lomijo *dvakrat*: enkrat ob vstopu v kapljico, drugič ob izstopu iz nje. Gre torej za *dvojni lom*. Pri dvojnem lomu se lahko učinek disperzije ali poveča ali zmanjša. Sami se lahko z risbo in s pomočjo enačbe (1) prepričate, da se učinek celo izniči, če sta vpadna in izstopna ploskev vzporedni, to je pri prehodu svetlobe skozi planpapranelno plast.

Pri dežni kapljici, torej krogli, nastopi tak primer le, če pade žarek pravokotno na njeno površino. Za vse druge smeri pa pride pri žarkih vseh redov, od drugega dalje do povečanega razklona svetlobe. Žarki drugega reda niso zanimivi, ker pri njih gledamo skoraj naravnost v sonce. Povedali smo že, da žarki tretjega in četrtega reda dajejo glavno in stransko mavrico, pri več kakor treh notranjih odbojih pa je izguba svetlobe že prevelika, da bi kaj videli.

Marija Vencelj