

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 6 (1978/1979)

Številka 4

Strani 248-257

Fedor Tomažič:

MAVRICA

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/6/372-Tomazic.pdf>

© 1979 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

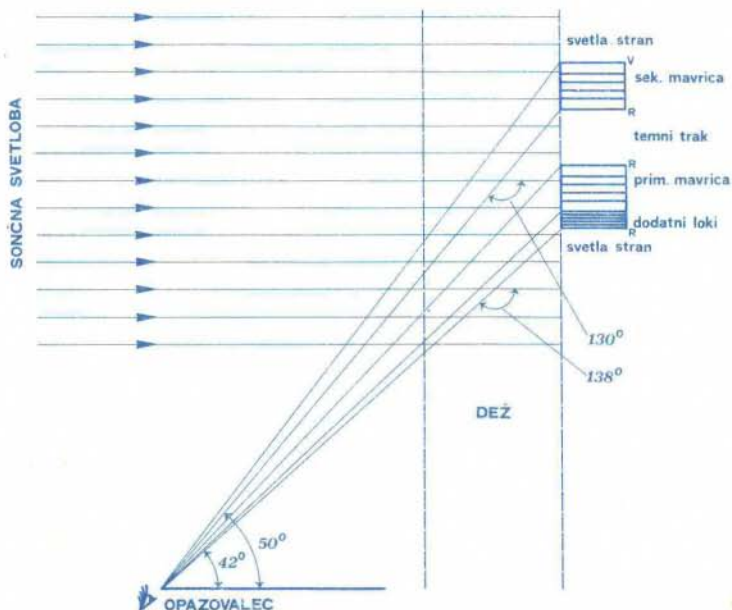
© 2009 DMFA - založništvo

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

MAVRICA

Spomladi in poleti lahko mnogokrat po nevihti opazujemo prelepe mavrične loke, ki se bočijo na nebu nad pokrajino, obsijano od sonca. Mavrico si lahko "naredimo" tudi sami, ko ob sončnem vremenu zalivamo vrt ali peremo avtomobil. Celo takrat, ko vržemo v vodo težak kamen in voda brizgne visoko v zrak in se razprši, jo zagledamo. Običajno nas mavrica prevzame, radi občudujemo njene lepe, čiste barve. Med preprostimi ljudmi so nastale številne vraže, ki človeku napovedujejo srečne dogodke, če na določenem kraju zagleda mavrico. Oglejmo si pojav podrobneje!

Mavrico vidimo takrat, ko je v zraku mnogo vodnih kapljic, na katerih se siplje sončna svetloba, ki prihaja opazovalcu izza hrbta (Sl. 1). Pod kotom okoli 42° glede na vodoravnico vidi



Slika 1.: Sončna svetloba se na dežnih kapljicah siplje. Svetloba, ki pride v oko opazovalca iz primarnega loka mavrice, se odkloni za približno 138° od prvotne smeri. Za sekundarni lok meri ta kot okoli 130° . Kota 138° in 130° imenujemo mavrična kota.

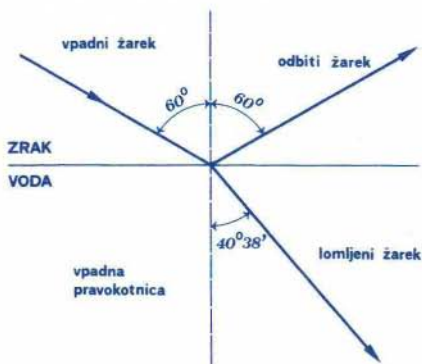
opazovalec *primarni mavrični lok* z izrazitimi barvami, ki si od spodaj navzgor sledijo takole: vijolična, modra, zelena, ružena, oranžna in rdeča. Nad primarnim lokom, pod kotom okoli 50° se vidi nekoliko šibkejši, širši *sekundarni mavrični lok*. Pozorni opazovalec ugotovi, da je zaporedje barv v tem loku obratno kot v primarnem. Del neba med lokoma je temnejši, imenujemo ga *temni trak*. Ob ugodnih okoliščinah se na spodnjem robu primarnega mavričnega loka pokaže še nekaj ozkih in šibkih komaj opaznih *dodatnih lokov*.

Nastanek mavričnih lokov si bomo razložili z odbojnim in lomnim zakonom za svetlobo.

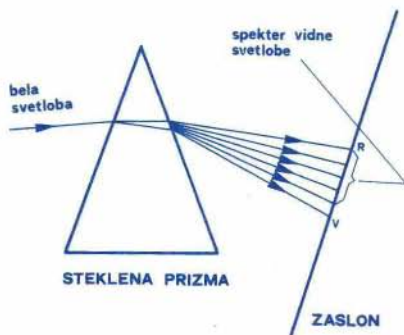
Ponovimo oba zakona. Slika 2 kaže curek svetlobe, ki vpada na mejo med zrakom in vodo. Del svetlobe se na tej meji odbije, del pa vstopi v vodo. Odbojni zakon pravi, da je odbojni kot enak vpadnemu in da leži odbiti žarek v ravnini, ki jo določata vpadni žarek in vpadna pravokotnica. Delež odbite svetlobe se veča z večanjem vpadnega kota. Curek svetlobe, ki prehaja v vodo, na meji spremeni smer. V narisanim primeru, ko gre svetloba iz zraka v vodo, je lomni kot manjši od vpadnega. Tudi pri prehodu iz vode v zrak se svetloba lomi; takrat je lomni kot večji od vpadnega. Zvezo med vpadnim in lomnim kotom za dani par sredstev povemo z lomnim zakonom. Razmerje med *sinusom* vpadnega kota in *sinusom* lomnega kota je konstantno za izbrani par snovi in je enako razmerju med hitrostma svetlobe v teh snoveh. Pri natančnem opazovanju vidimo, da je lomljeni curek na notranjem robu obarvan rdeče in na zunanjem modro. To je zato, ker je lomni količnik vode za vsako barvo svetlobe drugačen. Najmočnejše se lomi vijoličasta, najmanj pa rdeča svetloba. Še lepše vidimo to, če pade ozek curek bele sončne svetlobe na stekleno prizmo (sl. 3). Na zaslonu, postavljenem za prizmo, vidimo obarvan trak, v katerem si barve sledijo v zaporedju, ki ga že poznamo iz opisa mavrice. Ta obarvani trak imenujemo spekter sončne svetlobe. Poskus nam kaže, da sončna svetloba ni enobarvna, ampak da vsebuje vse mogoče *spektralne* barve. Pojav, da se svetloba zaradi loma razcepi v svoje sestavine, imenujemo *rasklon* ali *disperzija*.

Vzemimo, da na kapljico vpada enobarvna ružena svetloba z valovno dolžino okoli 5600 \AA . Slika 4 kaže, kaj se zgodi s svetlobo, ki jo prestreže kapljica. Del svetlobe se odbije na površju kapljice, del pa vstopi v kapljico in se znotraj večkrat odbije. Pri vsakokratnem vpadu na mejo med vodo in zrakom preide del svetlobe v zrak. Zanimala nas bo svetloba, ki preide v zrak po enem, dveh, treh ali večih zaporednih odbojih znotraj kapljice. Število notranjih odbojev bomo imenovali *red* izstopajočega curka. Poglejmo žarek, ki po enkratnem odboju v notra-

njosti zapusti kapljico. Kot, za katerega se odkloni žarek glede na vpadni žarek - imenovali ga bomo *sipalni kot* - je odvisen od *vpadnega parametra*, to je od pravokotne razdalje med žarkom in vzporednim žarkom skozi središče kapljice. Če je razdalja, to je vpadni parameter, enaka nič, je sipalni kot enak 180° ; žarek potuje skozi središče kapljice in se odbije nazaj proti Soncu. Ko vpadni parameter raste, se sipalni kot najprej zmanjšuje, nato pa začne spet naraščati. Okoli žarka, ki se odkloni za okoli 138° , je kot skoraj neodvisen od parametra. Vsa svetloba, ki vpada na kapljico z vpadnimi parametri v okolici žarka z najmanjšim odklonom, zapusti kapljico v isti smeri. Zato je v tej smeri svetloba zgoščena - povečana je gostota svetlobnega toka. Žarku z minimalnim odklonom pravimo *mavrični žarek*, ustreznemu kotu pa *mavrični kot*. Če bi opazovalec zrl v nebo pod kotom okoli 42° glede na vodoravnico, bi vpada-

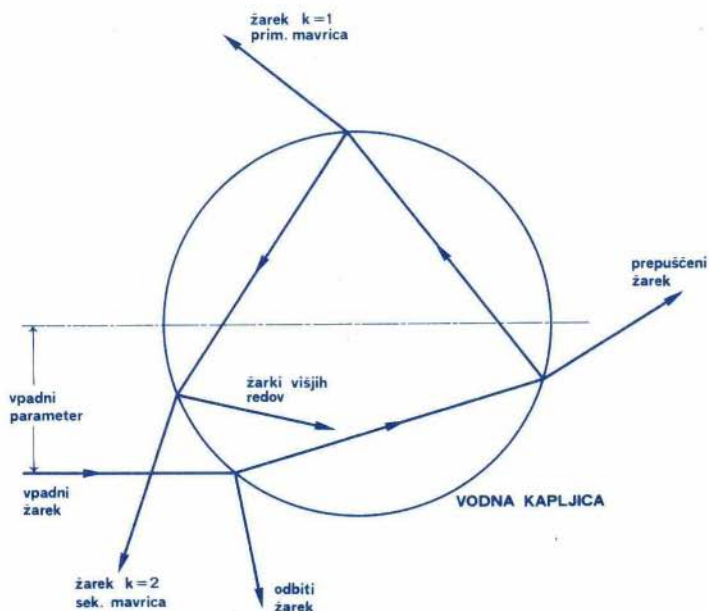


Slika 2.: Odboj in lom svetlobe na meji med zrakom in vodo sta osnovna vzroka za nastanek mavrice. Lomni kot je določen z vpadnim kotom in lastnostmi snovi, v katero vstopa svetloba. Snov z večjim lomnim količnikom močnejše lomi svetlobo. Lomni količnik snovi je za vsako barvo svetlobe nekoliko drugačen.



Slika 3.: Sončna svetloba, ki jo imenujemo tudi bela svetloba, se pri prehodu skozi stekleno prizmo dvakrat lomi (pri vstopu in izstopu). Na zaslonu se pojavi njen spekter, ki dokazuje, da je sončna svetloba sestavljena.

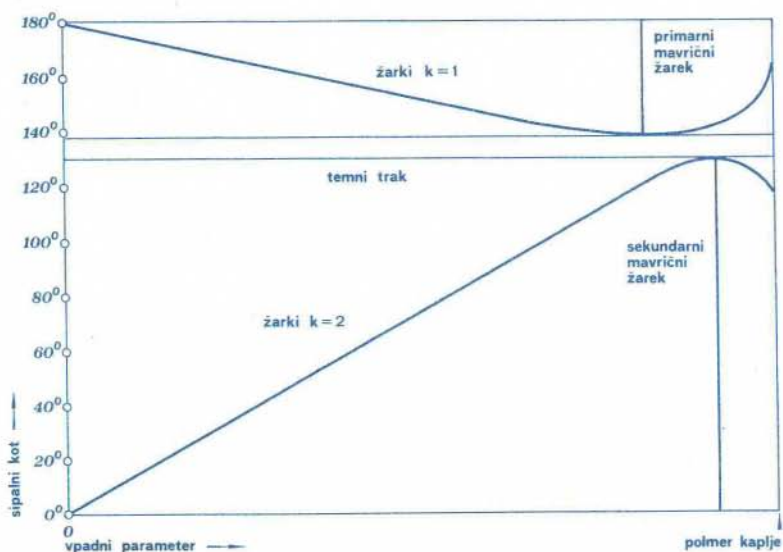
la v njegovo oko ravno ta zgoščena svetloba. Del neba, od koder bi prihajala, bi se mu zdel svetlejši. Videli pa smo, da sončna svetloba vsebuje vse spektralne barve, za katere je občutljivo človeško oko. Pri vsakem lomu na meji kapljice se svetloba razkloni. Posledica tega je, da pripada vsaki barvi nekoliko drugačen mavrični kot. Za rdečo svetlobo meri ta kot $137,6^{\circ}$, za modro pa $139,4^{\circ}$. Med tema vrednostima so mavrični koti za ostale barve sončnega spektra. K jasnosti mavričnih barv pripomore tudi odbojnost vode, ki je tudi odvisna od barve in vpadnega kota. Primarna mavrica je na vrhu (na zunanji strani) rdeča. Siplalni kot za rdečo svetlobo je $137,6^{\circ}$; ostalih barv pa v rde



Slika 4.: Svetloba, ki jo vodna kapljica prestreže, se na meji zrak-voda odbija in lomi. Narisane so mogoče poti svetlobnih žarkov. Vpadni parameter vsakega žarka določa kot, pod katerim kapljica siplje svetlobo. Mavrico tvorijo tisti žarki, ki se sipljejo proti opazovalcu. Ta je na tleh med Soncem in kapljicami.

čem področju loka skoraj ni. Notranji lok primarne mavrice je modro obarvan. Od tam prihaja v oko svetloba, ki se siplje pod kotom $139,4^{\circ}$. Poleg modre vsebuje tudi majhne primesi ostalih barv. Med rdečim in modrim delom mavričnega loka se pojavijo še ostale barve, vsaka pod svojim mavričnim kotom. Vidimo barvo, ki je v izbrani smeri najmočnejša.

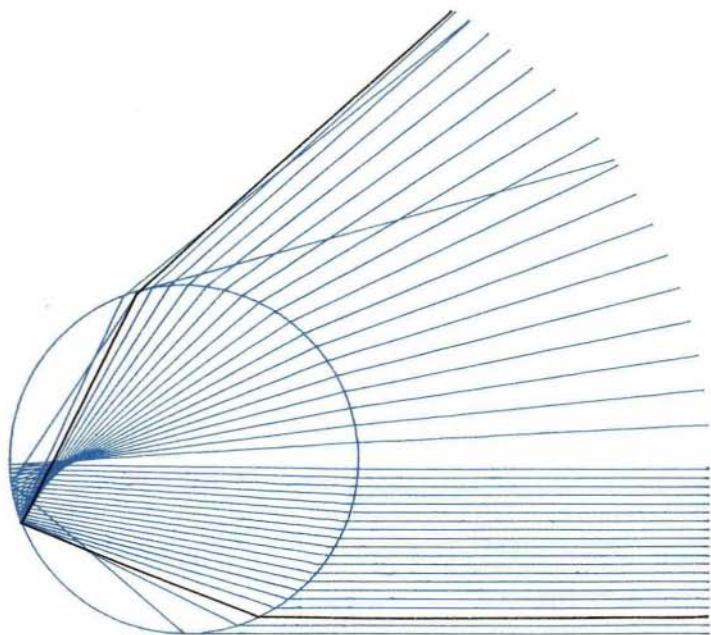
Tudi sekundarna mavrica nastane na podoben način, le da je pri njej mavrični žarek pri največjem sipalnem kotu, ki meri okoli 130° . Svetloba, ki oblikuje sekundarno mavrico, se v kapljicah dvakrat zaporedno odbije. Mavrica je zato manj svetla in tudi nekoliko širša od primarne. Na svetlem ozadju jo težje opazi-



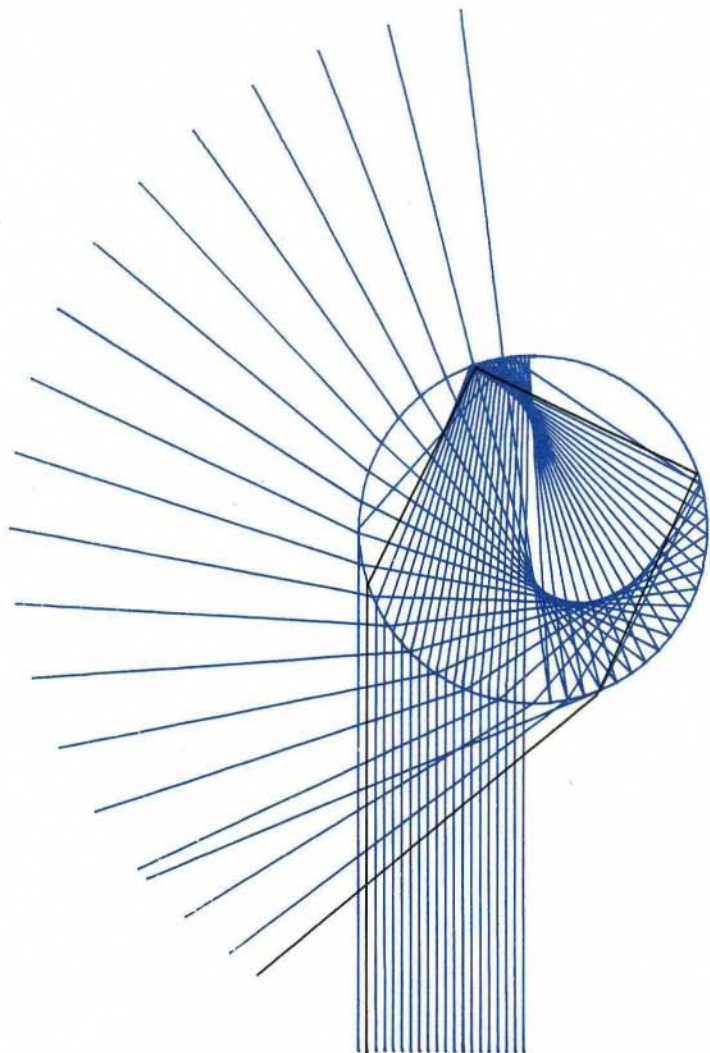
Sl. 5.a.: Na grafu vidimo odvisnost sipalnega kota od vpadnega parametra za žarke reda $k=1$ in $k=2$. Minimum na gornji krivulji ustreza mavričnemu kotu primarne mavrice, maksimum na spodnji krivulji pa mavričnemu kotu sekundarne mavrice. Čisto slučajno - igra narave - je pri teh mavričnih kotih jakost sipane svetlobe za vsako barvo, vsebovano v sončni svetlobi, nekoliko drugačna, kar pravzaprav omogoči, da te barve izstopajo iz ozadja. Ta različnost sipanja za vsako barvo je tudi vzrok, da je mavrica na modri strani nekoliko svetlejša.

mo, ker moti svetloba, ki se odbija na površju kapelj. Med mavricama, to je med kotoma 138° in 130° , ni sipane svetlobe (Sl. 5). Zato je nebo med mavricama temnejše od okoliškega neba.

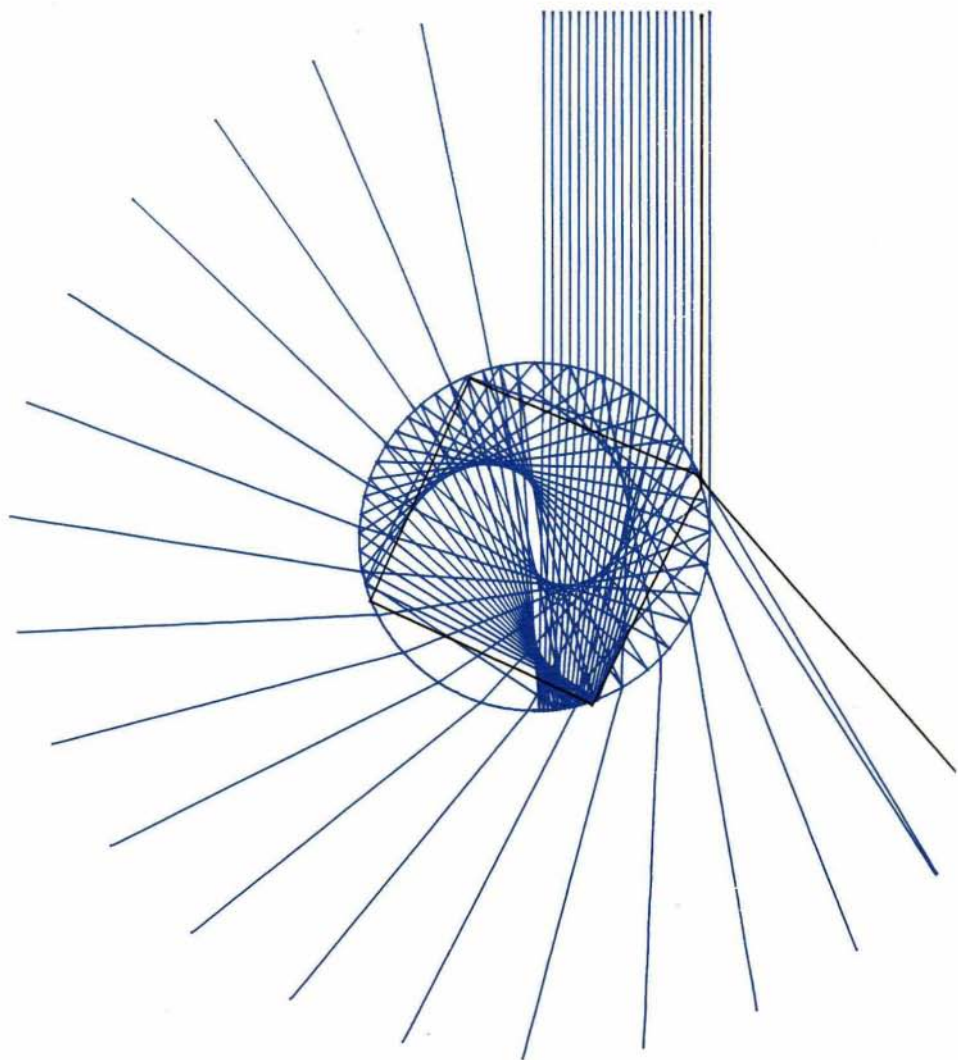
Svetloba se v notranjosti kapljic lahko tudi večkrat odbije. To vodi do nastanka mavric višjega reda ($K = 3, 4, 5, \dots$), ki so tudi posejane po nebu. Če bi te mavrice ne bile prešibke zaradi številnih notranjih odbojev, bi se opazovalcu nudila po ne-



Sl. 5.b.: Nastanek primarne mavrice. Najmanjši odklon od smeri vpadle svetlobe doživi žarek, narisani z drugo barvo. V okolici mavričnega žarka je gostota svetlobnega toka, ki izstopa iz kapljice, največja.



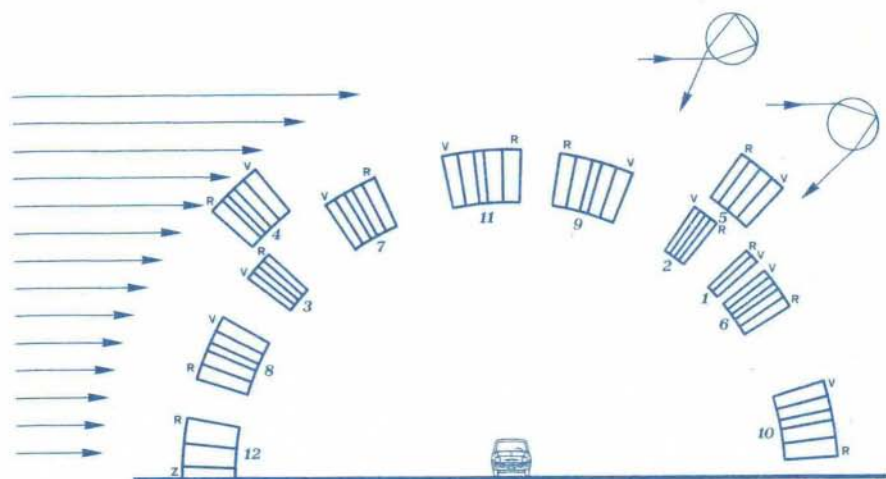
Sl. 5.c.: Svetloba, ki se v kapljici dvakrat zaporedoma odbije, povzroči nastanek sekundarne mavrice. Gostota svetlobnega toka, izhajajočega iz kapljice, je zdaj največja v okolici žarka, ki se najbolj odkloni od prvotne smeri.



Sl. 5.č.: Del vpadle svetlobe se v kapljici trikrat zapored odbije, kar vodi do nastanka mavrice tretjega reda ($k = 3$).

vihti čudovita slika. Videl bi pisan razpored mavričnih lokov, celo takrat, ko bi gledal proti Soncu. Slika 6 kaže razpored mavric za prvih nekaj redov. Za mavrice višjih redov so tudi vpadni koti mavričnih žarkov večji, zato se na kapljicah svetloba že pri vpadu močnejše odbija kot pri primarni in sekundarni mavrici. Kljub temu bi nekatere od teh mavric lahko opazovali v naravi, če ne bi motila odbita svetloba in svetlost neba v ozadju.

Z uporabo lomnega in odbojnega zakona svetlobe smo razložili nastanek mavrice. Toda mnogo vprašanj je ostalo še odprtih. Prav nič nismo povedali o dodatnih mavricah pod primarnim lokom, pa tudi o tem ne, zakaj so ti dodatni loki bolj vidni na vrhu mavrice kot spodaj in zakaj potem, ko dež pojenjuje, postaja mavrica šibkejša, dokler se ne stopi z ozadjem. Odgovor



Slika 6.: Če je Sonce na horizontu, bi opazovalec videl takšen razpored mavric (do $k=12$). V resnici vidimo na nebu le mavrice prvega in drugega reda, mavric višjih redov pa ne, ker so prešibke. Za Sonce višje na nebu se razpored mavric zavrti v smeri vrtenja urinega kazalca. Razdalja med opazovalcem in kapljicami ni pomembna, meri lahko nekaj m do nekaj km. Mavrice višjih redov lahko opazujemo v poskusu, ki je v članku opisan.

na ta vprašanja moramo poiskati s pomočjo drugih teorij o naravi svetlobe, geometrijska optika tu ne da odgovora.

Zdaj, ko smo izvedeli toliko novega o mavrici, bi radi tudi kaj preverili. S preprosto napravo a z velikim potrpljenjem lahko v dobro zatemnjenem prostoru opazujemo mavrico prvih dveh in tudi višjih redov, tja do trinajstega ali še celo več, na eni sami vodni kapljici. Potrebujemo diaprojektor in kartonasto škatlo. V škatlo zavrtamo ozko luknjico, ki jo osvetlimo s projektorjem, da dobimo ozek curek svetlobe. V curek postavimo kapljico vode, ki se je nabrala na koncu povoskane žice. Z zaslonko zastavimo curek svetlobe, da je osvetljena le polovica kapljice. Z nekaj truda in iznajdljivosti se lahko z dodatno zaslonko znebimo moteče odbite svetlobe. Mavrice, ki izhajajo iz kapljice, spoznamo po bleščečih barvah na kapljici. Še bolje bomo opazovali, če uporabimo pri opazovanju daljnogled. Poskus lepše uspe z večjimi kapljicami, s polmerom 1 mm ali več. Opazovanje mavric lahko ponovimo tudi s kapljami drugih kapljev in, na primer s kapljo sladkornega sirupa, ki ima večji lomni količnik kot voda. Mavrični koti, ki jih izmerimo v tem primeru, so nekoliko drugačni od tistih, ki jih dobimo z vodnimi kapljami. Ko iz kapljice sirupa izpareva voda, se povečuje lomni količnik sirupa, zato se spreminja razpored mavric.

Mavrice nekaj prvih redov lahko opazujemo tudi na bolj preprost način. Skozi ozko režo pravokotne oblike z močnim svetilom posvetimo na vodni curek, ki počasi izteka iz vodovodne pipe. Reža naj bo vzporedna s curkom. S prostim očesom z razdalje okoli 1 m lahko opazujemo mavrice, če je prostor zatemnjen.

Želimo vam veliko zabave in uspehov pri poskusih. Veseli bomo, če nam boste pisali o svojih uspehih. Učitelja lahko prosite, da vodni curek ali kapljo osvetli s svetlobo iz laserja. Ta svetloba je seveda enobarvna. Tudi "mavrice" bodo enobarvne, pri vsaki pa boste lahko opazovali dodatne loke. Mogoče si jih boste poskušali sami razložiti.