IZDAJA DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SLOVENIJE

ISSN 0473-7466

2023
Letnik 70
1

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

POLARIZACIJA MAVRIČNE SVETLOBE

MOJCA VILFAN

Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana
Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Ključne besede: mavrica, polarizacija svetlobe, Fresnelove enačbe

V prispevku obravnavamo polariziranost mavrične svetlobe. Najprej z geometrijsko sliko in numeričnim izračunom pojasnimo nastanek mavrice, nato pa s Fresnelovimi enačbami izračunamo stopnjo njene polariziranosti.

POLARISATION OF RAINBOW LIGHT

We discuss the polarisation of the rainbow light. First a geometric approach combined with numerical calculations is used to explain the appearance of a rainbow. Taking into account Fresnel equations, polarisation degree for a rainbow is obtained.

Uvod

Mavrica je razmeroma pogost vremenski pojav. Opazujemo jo lahko, kadar se svetloba s Sonca odbije in razkloni v dežnih kapljicah. Precej manj znano pa je, da je mavrična svetloba skoraj povsem polarizirana [1, 2]. Če opazujemo mavrico skozi linearni polarizator, ki prepušča svetlobo, polarizirano v vodoravni smeri, je zgornji del mavričnega loka v celoti viden. Ko polarizator zasučemo za 90°, vrhnji del mavričnega loka praktično izgine, vidni ostanejo le stranski robovi mavričnega loka (slika 1). S sukanjem polarizatorja lahko ugotovimo, da je mavrična svetloba polarizirana v smeri tangentno na mavrični lok.

Slika 1. Fotografija mavrice skozi linearni polarizator, ki prepušča svetlobo, polarizirano v vodoravni smeri (levo), in skozi polarizator, ki prepušča svetlobo, polarizirano v navpični smeri (desno). To nakazuje, da je mavrična svetloba skoraj povsem linearno polarizirana.

Preden se lotimo podrobnejšega izračuna stopnje polariziranosti mavrične svetlobe, ponovimo, kako mavrica sploh nastane. Mavrico lahko opazujemo, kadar svetloba s Sonca vpada na dežne kapljice, ki iz oblakov padajo proti tlom. Tipična velikost dežnih kapljic je nekaj milimetrov, s čimer tudi upravičimo obravnavo pojava v okviru geometrijske optike. Ko žarki s Sonca vpadejo na kapljico vode v zraku, se najprej lomijo v kapljico, nato se na zadnji strani kapljice odbijejo in ponovno lomijo, ko iz kapljice izhajajo. Kot, pod katerim se žarki lomijo, je odvisen od lomnega količnika vode – ta pa je odvisen od valovne dolžine svetlobe, torej od njene barve. Posledično se svetloba različnih barv v kapljici različno lomi in iz nje izstopa ojačena pod rahlo različnimi koti. Ko opazovalec pogleda proti nebu, svetlobo pod različnimi koti vidi različnih barv – vidi mavrični lok.

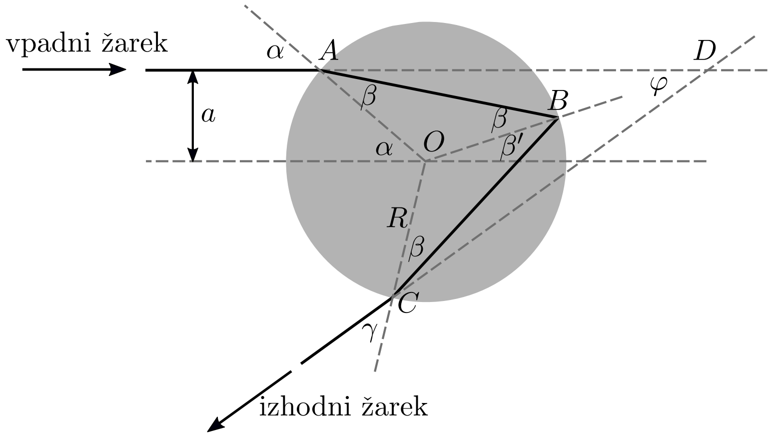
Pojav, da je lomni količnik snovi odvisen od valovne dolžine svetlobe, imenujemo disperzija. Lomni količnik, ki je definiran kot razmerje med hitrostjo svetlobe v vakuumu in hitrostjo svetlobe v snovi, je za vidno svetlobo v vodi okoli 1,33. Vendar je ta vrednost zgolj približna. Z natančnejšo analizo ugotovimo, da se lomni količnik za vidno svetlobo z naraščajočo valovno dolžino monotono zmanjšuje: pri valovni dolžini 400 nm je enak 1,344, pri valovni dolžini 700 nm pa 1,331 [4]. Razlike med lomnimi količniki so majhne, zato je tudi mavrični lok razmeroma ozek.

Mavrico vedno opazujemo v nasprotni smeri od Sonca in vedno pod istim kotom glede na smer vpadnih sončnih žarkov, to je približno 42°. Poleg osnovnega mavričnega loka lahko pogosto opazimo še en mavrični lok. Gre za sekundarno mavrico, ki nastane po dvakratnem odboju svetlobe v kapljicah vode. Ta zunanji lok vidimo pod kotom okoli 51°. Zaradi dodatnega odboja v kapljici je vrstni red barv v sekundarni mavrici obrnjen glede na osnovno mavrico.

Mavrični lok

Izračunajmo za začetek kot, pod katerim vidimo mavrico, tako da zapišemo pot svetlobnih žarkov skozi kapljico pri dani vrednosti lomnega količnika. Problem obravnavajmo ravninsko, pri čemer izbrano ravnino tvorijo Sonce, kapljica in opazovalec. Privzamemo, da vzporedni žarki na kapljico vpadajo v vodoravni smeri in izračunajmo kote, pod katerimi iz kapljice izhajajo posamezni vpadni žarki. Poleg lomnega količnika vode za izbrano valovno dolžino je ključni parameter odmik vpadnega žarka od sredine kapljice.

Označimo odmik od središča kapljice z a in polmer kapljice z R. Pri izračunu izhodnega kota v odvisnosti od parametra a si pomagamo s sliko 2.



Slika 2. Geometrijska pot žarka, ki na kapljico vpada na oddaljenosti a od središča kapljice in iz kapljice izhaja pod kotom φ.

Kot α označuje vpadni kot, to je kot med normalo na kapljico in smerjo vpadnega žarka v točki vpada A. Velja:

$$\sin\alpha = \frac{a}{R}. \tag{1}$$

Lomni kot β izračunamo z lomnim zakonom:

$$\sin\alpha = n\sin\beta, \tag{2}$$

pri čemer n označuje lomni količnik vode za izbrano valovno dolžino, za lomni količnik zraka pa smo vzeli vrednost 1. Svetlobni žarek potem prehaja skozi kapljico in vpada na njeno zadnjo stranico v točki B. Pri tem je vpadni kot enak kotu β, saj je trikotnik AOB enakokrak. Žarek se odbije od zadnje strani kapljice po odbojnem zakonu, tako da je $\beta' = \beta$, nato pa v točki C izhaja iz kapljice, pri čemer se ponovno lomi po lomnem zakonu. Za kot γ velja:

$$\sin\gamma = n\sin\beta.$$

Primerjava z enačbo (2) pokaže, da je $\gamma = \alpha$. Iz tega sledi, da svetlobni žarek skozi kapljico potuje simetrično glede na $\overline{OB}$.

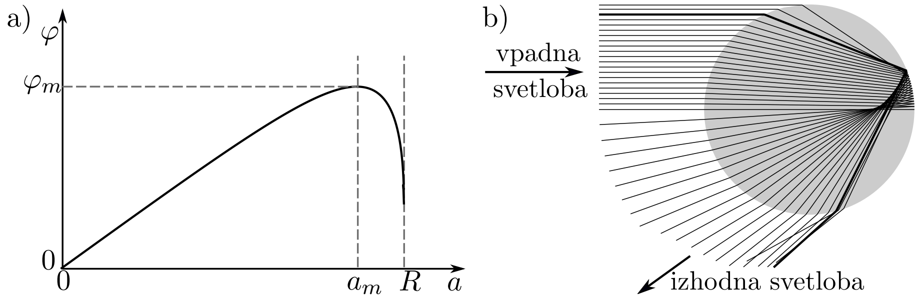
Smer izhodnega žarka glede na vodoravnico izračunamo tako, da smeri vpadnega in izhodnega žarka navidezno podaljšamo za kapljico in izračunamo kot φ v presečišču (točka D). Velja $\angle DOA = \angle BOA = \pi - 2\beta$. Ker je $\angle OAD = \alpha$, je $\angle ADO = \pi - \alpha - (\pi - 2\beta) = 2\beta - \alpha$, od koder sledi, da je kot φ med smerjo vpadnega in smerjo izhodnega žarka enak:

$$\varphi = 2(2\beta - \alpha).$$

Izrazimo še kot α s parametrom a (1) in kot β iz enačbe (2). Dobimo:

$$\varphi = 4 \arcsin \frac{a}{nR} - 2 \arcsin \frac{a}{R}. \tag{3}$$

Narišimo funkcijsko odvisnost izhodnega kota φ od vpadnega parametra a za $0 < a < R$ (slika 3 a). Vrednosti $-R < a < 0$ ne obravnavamo, saj žarki, ki vstopajo v kapljico pod središčem, iz kapljice izhajajo pri kotih $\varphi < 0$. Te žarke opazovalec vidi le v obliki šibkejše sekundarne mavrice, ko se žarki znotraj kapljice dvakrat odbijejo, k primarni mavrici pa ne prispevajo.



Slika 3. Izhodni kot kapljice φ v odvisnosti od vpadnega parametra a (a). Izhodni kot je navzgor omejen s φ_m in doseže največjo vrednost pri a_m. Prikaz poti žarkov skozi kapljico (b). Žarek, ki na kapljico vpada pri a_m in iz nje izhaja pod največjim kotom φ_m, je označen z debelejšo črto.

Žarki, ki vpadajo na kapljico pri majhnih vrednostih a, izhajajo iz kapljice praktično v smeri nazaj. Pod majhnimi koti izhajajo tudi žarki, ki vpadajo na kapljico povsem na vrhu. Vmes doseže odvisnost $\varphi(a)$ maksimum. Lego tega maksimuma in vrednost največjega kota, pod katerim izhajajo žarki, preprosto izračunamo. Izračunamo odvod:

$$\frac{d\varphi}{da} = \frac{4}{\sqrt{n^2R^2 - a^2}} - \frac{2}{\sqrt{R^2 - a^2}} \tag{4}$$

in poiščemo vrednost a_m, pri kateri je odvod enak nič. Dobimo:

$$a_m = R\sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}.$$

Pri tej oddaljenosti od središča vstopajo žarki, ki iz kapljice izhajajo pod največjim izhodnim kotom. Za $n = 1{,}33$ je $a_m \approx 0{,}862R$, pripadajoči največji kot φ_m pa izračunamo tako, da vstavimo a_m v enačbo (3). Dobimo $\varphi_m \approx 42{,}5°$. Pri kotih, ki so večji od φ_m, žarki iz kapljice ne izhajajo.

Pri dežju se kapljice nahajajo na vseh višinah od tal do oblaka. Le na tistih kapljicah, iz katerih se svetloba do naših oči širi pod kotom okoli φ_m, vidimo mavrico, saj se pri tem izhodnem kotu svetlobni žarki najbolj zgostijo in svetloba ojači. Iz nižje ležečih kapljic se svetloba šibko odbija v smeri nazaj, iz višje ležečih kapljic pa se svetloba do opazovalca ne odbija, zato je nebo nad mavričnim lokom temnejše kot pod njim.

Z grafa $\varphi(a)$ razberemo še eno pomembno značilnost: k istemu izhodnemu kotu φ na splošno prispevajo žarki, ki vstopajo v kapljico pri dveh različnih vrednostih a, eni večji in eni manjši od a_m. Za izračun intenzitete izhodne svetlobe pri danem φ moramo oba prispevka sešteti.

Izračunajmo natančneje porazdelitev intenzitete izhodne svetlobe. Svetloba s Sonca na kapljice vpada s konstantno gostoto svetlobnega toka j_0, ki je definirana kot vpadni svetlobni tok na enoto površine oziroma pri ravninski obravnavi na enoto dolžine. Zaradi loma znotraj kapljice se vpadni svetlobni tok ob izhodu preporazdeli. Za začetek izračunajmo le preporazdelitev gostote svetlobnega toka v odvisnosti od kota φ (torej zgoščevanje žarkov) in še ne upoštevajmo, da se gostota svetlobnega toka zmanjšuje zaradi lomov in odboja na meji med kapljico in zrakom. To bomo dodali v nadaljevanju.

Svetlobni tok, ki vpada na delček velikosti da, zapišemo kot $dP_v = j_0 da$, pri čemer je j_0 konstanten. Izhodni svetlobni tok na delček velikosti ds podobno zapišemo kot $dP_i = j_i ds$. Pri tem j_i označuje gostoto izhodnega svetlobnega toka, ki je funkcija kota φ, ds pa izpišemo kot $R' d\varphi$, pri čemer je R' oddaljenost od kapljice in $R' \gg R$. Ker zmanjševanja svetlobnega toka zaradi lomov in odboja za zdaj ne upoštevamo, vpadni in izhodni svetlobni tok izenačimo. Zvezo med njima določa odvisnost $\varphi(a)$. Zapišemo:

$$dP_i = j_i R' d\varphi = j_i R' \frac{d\varphi}{da} da.$$

Upoštevamo enakost $dP_v = dP_i$ in izrazimo gostoto izhodnega svetlobnega toka:

$$j_i = \frac{dP_v}{R' da} \frac{1}{d\varphi/da} = \frac{j_0 da}{R' da} \frac{1}{d\varphi/da},$$

od koder sledi:

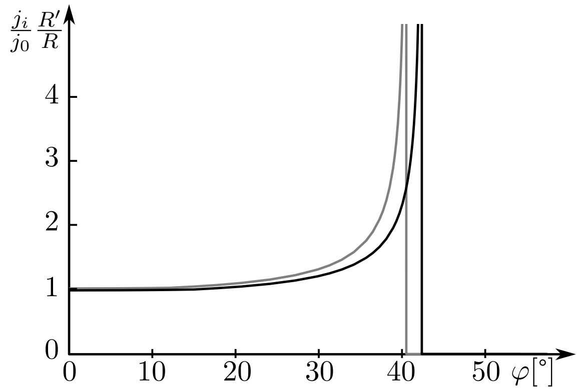
$$\frac{j_i}{j_0} = \frac{1}{R'} \frac{1}{d\varphi/da}.$$

Gostota izhodnega svetlobnega toka je največja, kadar je odvod $d\varphi/da$ enak nič oziroma kadar je izhodni kot φ enak φ_m.

Odvisnosti j_i/j_0 ne moremo preprosto izraziti, lahko pa jo izračunamo numerično pri danih R'/R. Pri tem ne smemo pozabiti, da k izhodni svetlobi pri večini izhodnih kotov φ prispevajo žarki, ki vstopajo v kapljico pri dveh različnih oddaljenostih od središča a. Celoten prispevek pri danem izhodnem kotu je tako sestavljen iz dveh vej rešitev, ki ju je treba sešteti.

Izhodna gostota svetlobnega toka je prikazana na sliki 4 za dve vrednosti lomnega količnika ($n = 1{,}344$ in $n = 1{,}331$). S slike je razvidno, da je vrh intenzitete izhodne svetlobe res pri največjem izhodnem kotu φ_m, kar se ujema z žarkovno sliko. Poleg tega račun pokaže, da velika večina svetlobnega toka izhaja iz kapljice v zelo majhnem intervalu izhodnih kotov, zato je mavrični lok zelo ozek.

V preprosti obliki, v kateri obravnavamo pojav mavrice, se pri mejnem kotu pojavi divergenca gostote svetlobnega toka. Vendar je vrednost gostote zelo velika le v zelo majhnem intervalu kota φ v bližini φ_m. Če izračunamo skupni izhodni svetlobni tok kot integral gostote svetlobnega toka po izstopnem kotu oziroma loku, je vrednost integrala končna.

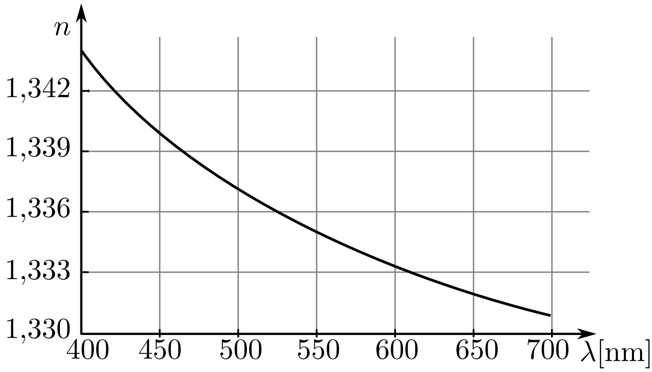


Slika 4. Vpadni svetlobni tok se ob prehodu skozi kapljico preporazdeli. Izhodna gostota svetlobnega toka j_i v bližini mejnega kota φ_m močno naraste, kar se ujema s predstavo, da se tam izhodni žarki najbolj zgostijo. Črna črta velja za $n = 1{,}331$ in siva za $n = 1{,}344$.

Barve mavrice

V uvodu smo povedali, da je lomni količnik vode odvisen od valovne dolžine vpadne svetlobe. Za vijolično barvo ($\lambda \approx 400$ nm) je okoli 1,344, za rumeno ($\lambda \approx 580$ nm) okoli 1,334 in za rdečo ($\lambda \approx 700$ nm) okoli 1,331 (slika 5).

Na sliki 4 smo že videli odvisnost gostote svetlobnega toka j_i od izhodnega kota φ za dve različni vrednosti lomnega količnika. Vrednosti lomnih



Slika 5. Odvisnost lomnega količnika n od valovne dolžine svetlobe λ za vodo [5].

količnikov ustrezata lomnima količnikoma za vijolično (siva črta) in rdečo svetlobo (črna črta). Največji izstopni kot je tako za vijolično svetlobo (λ = 400 nm) pri φ_m = 40,5° in za rdečo (λ = 700 nm) pri φ_m = 42,4°. Vrednosti za druge barve so med omenjenima mejnima vrednostma.

Na splošno barve niso določene le z eno samo valovno dolžino, temveč vsaki barvi ustreza interval valovnih dolžin. Pravzaprav tudi ti intervali niso povsem točno določeni, saj se barve zvezno prelivajo iz ene v drugo. Navadno privzamemo, da svetloba rdeče barve obsega valovne dolžine v vidnem območju med 625 in 750 nm [6]. Tem valovnim dolžinam pripada vrednost valovnega količnika med 1,3325 in 1,3305, ustrezna φ_m za skrajni vrednosti intervala rdeče svetlobe pa sta 42,15° in 42,44°. Po drugi strani ležijo koti, pod katerimi vidimo vijolično barvo z valovnimi dolžinami med 380 in 450 nm, na intervalu med 40,36° in 41,07°.

Večji izhodni kot določene barve pomeni večji kot, pod katerim to barvo opazujemo glede na vodoravnico. Zato je zunanji lok mavrice rdeče barve, notranji vijolične, znotraj mavrice pa si barve sledijo v običajnem spektralnem zaporedju: rdeča, oranžna, rumena, zelena, modra in vijolična.

Polarizacija mavrične svetlobe

Do zdaj smo pri računu gostote svetlobnega toka upoštevali samo preporazdelitev izhodnih žarkov in s tem določili kote, pri katerih izhaja iz kapljice največ svetlobe izbrane barve. Dopolnimo ta račun še z upoštevanjem odbojnosti pri lomu in odboju. Kolikšen je delež prepuščene in odbite svetlobe ob vpadu na mejo med dvema snovema, podajajo tako imenovane Fresnelove enačbe, ki se imenujejo po francoskem fiziku Augustu-Jeanu Fresnelu (1788–

1827). S temi enačbami lahko izračunamo delež odbitega ali prepuščenega svetlobnega toka pri vpadu na mejo med zrakom in vodo. Pomembna ugotovitev je, da se različno polarizirana vpadna svetloba različno močno odbija.

Na splošno lahko polarizacijo svetlobe (to je smer jakosti električnega polja v elektromagnetnem valovanju) opišemo kot linearno kombinacijo dveh ortogonalnih komponent. Priročno je izbrati eno komponento polarizacije v vpadni ravnini, določeni s smerema vpadne in lomljene svetlobe, in drugo v smeri pravokotno na vpadno ravnino. Valovanje, ki je polarizirano pravokotno na vpadno ravnino, imenujemo transverzalno električno polarizirano valovanje (na kratko TE valovanje). Valovanje, pri katerem leži jakost električnega polja v vpadni ravnini in je nanjo pravokotno magnetno polje, imenujemo transverzalno magnetno polarizirano valovanje (oziroma TM valovanje).

Svetloba s Sonca, ki vpada na dežne kapljice, je nepolarizirana. To pomeni, da se jakost električnega polja valovanja v ravnini, ki je pravokotna na smer širjenja svetlobe, zelo hitro in naključno spreminja. V povprečju so vse smeri polarizacije enakomerno zastopane, zato za račun zadošča, če ga naredimo za dve medsebojno ortogonalni linearni polarizaciji, in rečemo, da v povprečju vsaka od njiju prispeva polovično k celotnemu vpadnemu svetlobnemu toku.

Naj svetloba, ki v enakem deležu vsebuje obe ortogonalno polarizirani valovanji, vpada na mejo med snovema. Vpadni kot označimo z α, lomni kot, ki ga izračunamo po lomnem zakonu (2), pa z β. Potem sta razmerji med intenziteto odbite in vpadne svetlobe R za TE polarizirano valovanje [3]:

$$R_{\mathrm{TE}} = \left(\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}\right)^2$$

in za TM polarizirano valovanje:

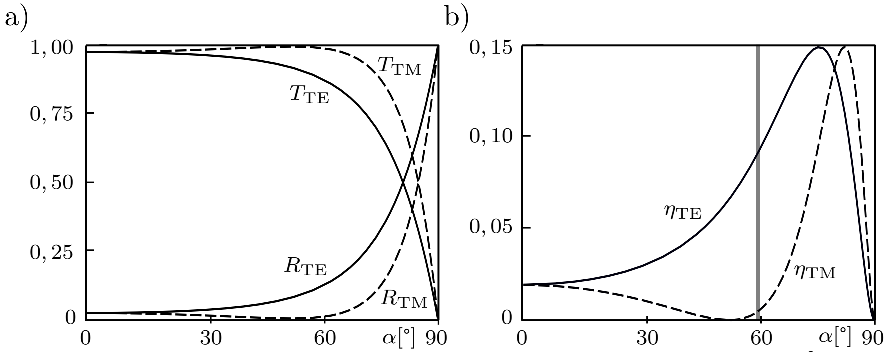
$$R_{\mathrm{TM}} = \left(\frac{\tan(\alpha-\beta)}{\tan(\alpha+\beta)}\right)^2 . \tag{5}$$

Pri tem opazimo, da je odbojnost simetrična na zamenjavo kotov α in β, torej je enaka, če svetloba vpada na mejo iz zraka pod kotom α, ali če vpada na mejo iz vode pod kotom β.

Delež prepuščenega svetlobnega toka T je preprosto izračunati, saj se v snoveh brez absorpcije skupna energija ohranja. Velja:

$$T_{\mathrm{TE}} = 1 - R_{\mathrm{TE}} \qquad \text{in} \qquad T_{\mathrm{TM}} = 1 - R_{\mathrm{TM}}.$$

Za lažjo predstavo narišimo odvisnosti odbojnosti in prepustnosti od vpadnega kota α (slika 6 a). Pri pravokotnem vpadu $\alpha = 0$ sta odbojnosti za obe polarizaciji enaki. Z naraščajočim vpadnim kotom odbojnost R_{TE} za TE polarizirano valovanje narašča, odbojnost R_{TM} za TM polarizirano valovanje pa najprej pojema, doseže ničlo, nato pa naraste do vrednosti 1 pri $\alpha = 90°$.



Slika 6. Odvisnost odbojnosti R in prepustnosti T (a) ter produkta $\eta = T^2 R$ (b) od vpadnega kota α za ortogonalni polarizaciji TE in TM. Sivo je označeno ozko območje vpadnih kotov α, ki ustreza območju izhodnih kotov, pod katerim vidimo mavrico.

Kot, pri katerem odbojnost TM polariziranega valovanja doseže ničlo, imenujemo Brewsterjev kot, po škotskem fiziku Siru Davidu Brewstru (1781–1868). Pri tem vpadnem kotu je vsa TM polarizirana svetloba prepuščena, vsa odbita svetloba pa TE polarizirana. Brewsterjev kot lahko izračunamo iz pogoja, da je $R_{\mathrm{TM}} = 0$, kar se zgodi, ko je imenovalec v ulomku (5) neomejen. Pogoj je izpolnjen pri $\alpha_B + \beta_B = 90°$. Izhajamo iz lomnega zakona (2), v katerem upoštevamo zvezo:

$$\sin\beta_B = \sin(90° - \alpha_B) = \cos\alpha_B,$$

in zapišemo enačbo za izračun Brewstrovega kota:

$$\tan\alpha_B = n.$$

Pri prehodu iz zraka v vodo je Brewstrov kot $\alpha_B \approx 53°$, pri prehodu iz vode v zrak pa $\approx 37°$. Ta kot je zelo blizu kotom β, pod katerimi se od zadnje strani kapljice odbija svetloba, ki iz nje izhaja kot mavrica. Spomnimo se, da ojačena svetloba izhaja pod kotom, ki ustreza $a_m \approx 0{,}862R$, od koder izračunamo $\alpha_m \approx 59{,}5°$ in $\beta_m \approx 40{,}4°$.

Delež energijskega toka svetlobe, ki izhaja iz kapljice, izračunamo s tremi zaporednimi procesi: prehod skozi mejo v kapljico, odboj na zadnji strani kapljice in prehod iz kapljice v zrak. Delež označimo z η in ga izračunamo v odvisnosti od vpadnega kota α za vsako polarizacijo posebej.

$$\eta_{\mathrm{TE}} = T_{\mathrm{TE}} R_{\mathrm{TE}} T_{\mathrm{TE}} \qquad \text{in} \qquad \eta_{\mathrm{TM}} = T_{\mathrm{TM}} R_{\mathrm{TM}} T_{\mathrm{TM}}.$$

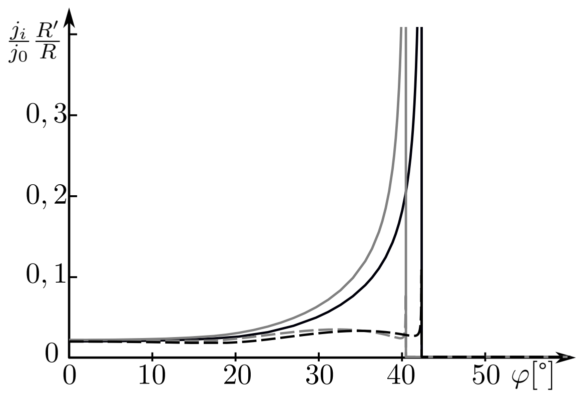
Delež η v odvisnosti od vpadnega kota α je prikazan na sliki 6 b za obe polarizaciji. Za naš izračun so pomembne le tiste vrednosti η, pri katerih izhaja ojačena svetloba iz kapljic. To se zgodi na intervalu izhodnih kotov $40{,}5^\circ < \varphi_m < 42{,}4^\circ$, kar ustreza vpadnim kotom $58{,}8^\circ < \alpha < 59{,}5^\circ$. Na tem ozkem intervalu, ki je na sliki označen senčeno, je delež za TE polarizirano svetlobo razmeroma velik ($\eta_{\mathrm{TE}} \approx 0{,}085$), delež za TM polarizirano svetlobo pa zelo majhen ($\eta_{\mathrm{TM}} \approx 0{,}0027$). Vpeljemo in izračunamo še stopnjo polariziranosti [2]:

$$\frac{\eta_{\mathrm{TE}} - \eta_{\mathrm{TM}}}{\eta_{\mathrm{TE}} + \eta_{\mathrm{TM}}} \approx 94\ \%.$$

Svetloba, ki izhaja iz kapljic, je torej skoraj povsem linearno polarizirana.

Za konec določimo še celotno gostoto svetlobnega toka, ki izhaja iz kapljic, v odvisnosti od izhodnega kota φ za vsako od polarizacij, tako da upoštevamo še preporazdelitev gostote žarkov. Račun naredimo tako, da intenziteto vstopnega žarka ustrezno utežimo v odvisnosti od vstopnega kota α, nato pa ponovno numerično seštejemo prispevke obeh vej rešitev.

Izračunana odvisnost je prikazana na sliki 7 za primer svetlobe rdeče in vijolične barve za obe polarizaciji.



Slika 7. Ustrezno utežena izhodna gostota svetlobnega toka j_i v odvisnosti od izhodnega kota φ za $n = 1{,}331$ (rdeča svetloba, črni črti) in $n = 1{,}344$ (vijolična svetloba, sivi črti), pri čemer je j_0 gostota vpadnega energijskega toka. Črtkani črti označujeta TM polarizirano svetlobo, polni črti pa TE polarizirano.

Vidimo, da je gostota svetlobnega toka TM polarizirane svetlobe v obeh primerih zelo majhna in praktično zanemarljiva v primerjavi s TE polarizirano svetlobo. Čeprav je odbojnost TM polarizacije pri Brewstrovem kotu enaka nič, TM polarizirana izhodna svetloba za $\varphi < \varphi_m$ nikjer ne pade povsem na nič. Razlog je v tem, da v isti izhodni kot prispeva tudi druga veja žarkov, za katero je odbojnost sicer majhna, vendar različna od nič. Izhodna svetloba ima zato pod vsemi izstopnimi koti tudi zelo šibko TM polarizirano komponento svetlobe, ki pa je zanemarljiva v primerjavi z močno TE polarizirano svetlobo.

Z integracijo gostote izhodnega svetlobnega toka po izhodnem kotu določimo še razmerje med svetlobnima tokovoma obeh polarizacij v danem majhnem intervalu izhodnega kota. Zaradi dveh vej žarkov, ki izhajajo pod istim izhodnim kotom, se stopnja polariziranosti malenkost zmanjša, na okoli 92 %.

Zaključek

S preprostim numeričnim izračunom smo pokazali, da je svetloba, ki izhaja iz dežnih kapljic, ko na njih posije Sonce, skoraj povsem TE polarizirana. Spomnimo se, da pomeni TE polarizacija smer električnega polja pravokotno na vpadno ravnino. Gledano iz smeri opazovalca to pomeni, da leži jakost električnega polja svetlobe, ki izhaja iz dežnih kapljic, tangentno na mavrični lok. Če mavrico opazujemo skozi linearni polarizator, ki prepušča svetlobo v navpični smeri, vrhnji del mavrice izgine, vidni pa ostanejo stranski deli mavričnega loka, čeprav oslabljeni. Nasprotno zasukan polarizator, ki prepušča svetlobo v vodoravni smeri, prepusti zgornji del mavrice, stranski dela loka pa močno oslabijo. S tem pokažemo, da je svetloba iz mavrice res polarizirana, in hkrati bralcem damo namig, da zanimivi optični pojavi postanejo še zanimivejši, kadar jih opazujemo skozi polarizator.

LITERATURA

[1] J. A. Adam, *The mathematical physics of rainbows and glories*, Phys. Rep. **356** (2002) 229–365.

[2] G. R. Graham, *Polarization of Rainbows*, Phys. Educ. **10** (1975) 50–51.

[3] E. Hecht, *Optics, Fifth edition*, Pearson Education Limited (2017).

[4] The International Association for the Properties of Water and Steam, *Release on the Refractive Index of Ordinary Water Substance as a Function of Wavelength, Temperature and Pressure*, IAPWS, R9-97 (1997).

[5] *Refractive index of water*, dostopno na `http://www.philiplaven.com/p20.html`, ogled 16. 1. 2022.

[6] *Visible spectrum*, dostopno na `https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum`, ogled 16. 1. 2022.