

Kazalo

1	Električni in optični pojavi	5
1.1	Elektrika v ozračju	5
1.1.1	Električno polje v ozračju ob lepem vremenu	5
1.1.2	Razdelitev naboja	8
1.1.3	Udari strel	10
1.2	Optični pojavi	13
1.2.1	Pojavi zaradi sipanja svetlobe	13
1.2.2	Pojavi v zvezi z ukrivljanjem žarkov skozi ozračje	14
1.2.3	Lom in odboj na kapljicah in kristalčkih – mavrica, hálo in sij na rosi	15

1

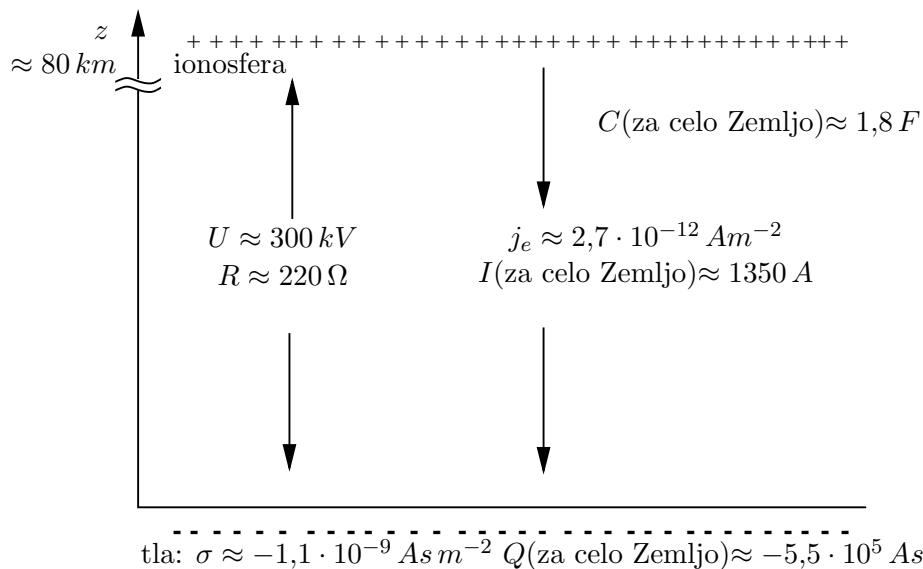
Električni in optični pojavi

1.1 Električna v ozračju

1.1.1 Električno polje v ozračju ob lepem vremenu

Začnimo z opisom razmer v mirnem ozračju brez oblakov. Tla so električno prevodna in ob lepem vremenu negativno nabita, ploskovna gostota naboja σ je okrog $-1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Asm}^{-2}$. Za vso Zemljo dobimo po vsej njeni površini skupni negativni naboj tal okrog $Q \approx -5,5 \cdot 10^5 \text{ As}$. Vendar zrak ni popoln izolator, saj je delno ioniziran. Vzrok za to so predvsem kozmični žarki. V zgornji troposferi in v spodnji stratosferi, kjer ti žarki vstopajo v relativno goste plasti ozračja, ionizirajo zrak. Zato največ ionov nastaja v višini kakih 14 km – reda velikosti deset milijonov parov v vsakem kubičnem metru na sekundo. V še večjih višinah, kjer je zrak že zelo redek, povzročajo ionizacijo žarki x in ultravijolični žarki. Zaradi skoraj popolne ioniziranosti in velike gibljivosti ionov (v zelo redkem ozračju je prosta pot velika) je ionosfera (med 80 km in 300 km višine) povsem prevodna. Blizu tal je ioniziranost zraka majhna. Majhna je tudi gibljivost ionov, zato je prevodnost zraka tudi majhna. Električna poljska jakost E je zato pri tleh sorazmerno velika, okoli 130 V/m . V zraku nad tlemi je zaradi presežka pozitivnih ionov nad negativnimi prostorsko porazdeljen pozitivni naboj. Zato jakost električnega polja z višino ne pada obratno sorazmerno z kvadratom razdalje, kot bi pričakovali pri površinsko ali volumsko porazdeljenem naboju, ampak pada približno eksponencialno. Tako je na višini 10 km vrednost električne poljske jakosti E samo še $E = 1 \text{ V/m}$.

Skupna napetost U med prevodnimi tlemi in prevodno ionosfero je okrog



Slika 1.1: Povprečne vrednosti raznih električnih količin za površje tal, ozračje in ionosfero.

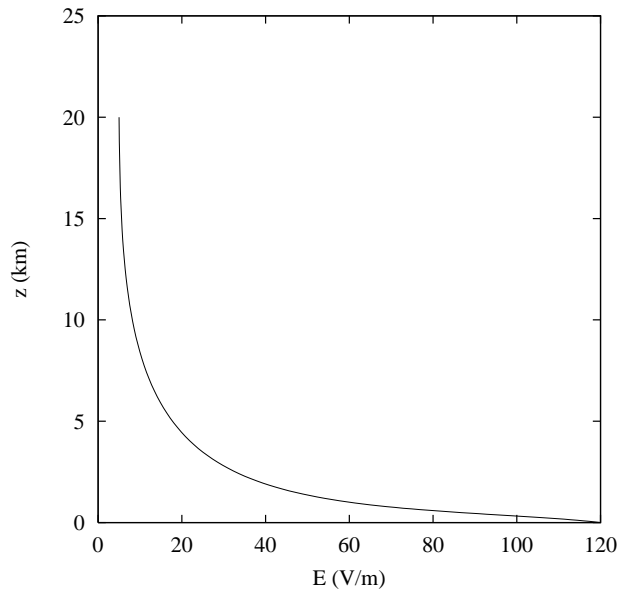
$U = 300 \text{ kV}$. Ker zrak ni popoln izolator, teče električni tok od tal navzgor: elektroni in negativni ioni navzgor, pozitivni ioni pa navzdol. Na gostoto toka vplivata tako jakost električnega polja, kakor tudi prevodnost. Povedali smo že, da prevodnost z višino narašča in da jakost električnega polja pada, zato je gostota električnega toka j_e po višini približno konstantna: $j_e \approx 2,7 \cdot 10^{-12} \text{ Am}^{-2}$. To je sicer majhna gostota toka, a če jo seštejemo po vsej zemeljski površini, dobimo skupen tok od tal navzgor okrog $I \approx 1350 \text{ A}$. Ta je že tolikšen, da bi se potencialna razlika med tlemi in ionosfero izravnala, če se ne bi presežek pozitivnih nabojev v ozračju znava in znova obnavljal.

Ocenimo, kako hitro bi se zaradi toka navzgor izravnal ta presežek naboja! Tla so prevodna, prevodna pa je tudi ionosfera na višini kakih 80 km od tal. Med njima je napetost okrog 300 kV. Torej je ozračje s tlemi in ionosfero kot nekak kondenzator, ki rahlo "pušča", saj od tal k ionosferi teče že omenjeni tok z jakostjo okrog $I \approx 1350 \text{ A}$.

Izračunajmo torej, kako hitro bi se spraznil ta kondenzator!

Kapaciteto izračunamo kot:

$$C = \frac{Q}{U} \approx 1,8 \text{ F}, \quad (1.1)$$



Slika 1.2: Odvisnost povprečne električne poljske jakosti $E = -\frac{\partial U}{\partial z}$ od višine v ozračju. Vrednost pri tleh je $E_0 \approx -130 \text{ V m}^{-1}$.

upor pa ocenimo iz napetosti in toka:

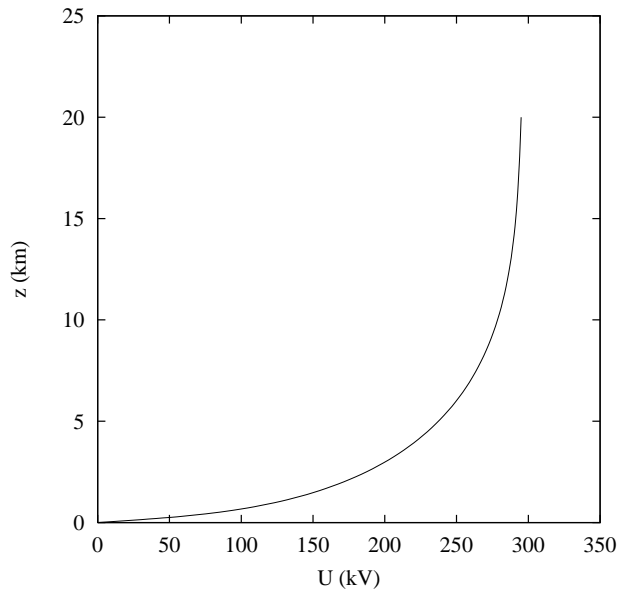
$$R = \frac{U}{I} \approx 220 \Omega. \quad (1.2)$$

Kako hitro bi se kondenzator praznil, ocenimo z znano enačbo za praznjenje kondenzatorja (npr. *Strnad: Fizika – Drugi del, 1978*):

$$U = U_0 \exp \frac{-t}{\tau}, \quad (1.3)$$

pri čemer je $\tau = RC$ značilni čas, v katerem naboj ali napetost na kondenzatorju pade za faktor $1/e$. Iz naših ocen za kapaciteto in upor dobimo $\tau \approx 400 \text{ s} \approx 7 \text{ min}$.

Torej bi se kondenzator tla-ionosfera samo zaradi prevodnosti zraka (tudi če ne bi bilo udarov strel) kaj hitro izpraznil. V ozračju pa se neprestano dogajajo tudi procesi, ki ves čas učinkovito skrbijo za razdeljevanje naboja in tako polnijo ta kondenzator. To se dogaja v oblakih, predvsem v nevihtnih, in sicer s procesom razdelitve naboja.



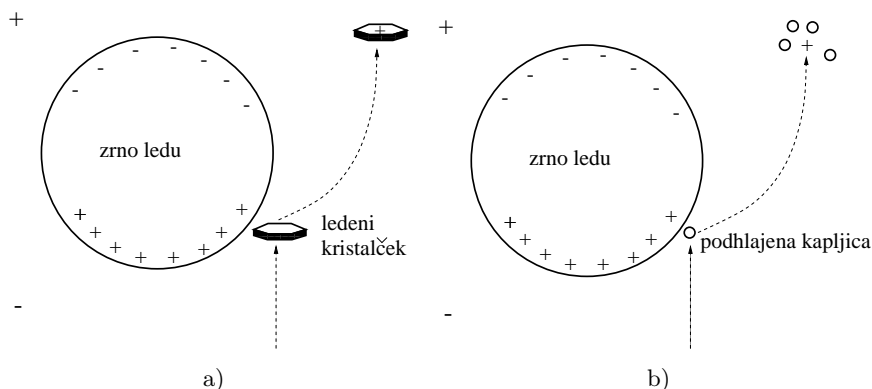
Slika 1.3: Povprečno naraščanje električne napetosti ozračja z višino glede na tla.

1.1.2 Razdelitev naboja

Kako se v oblakih električni naboj deli, da imamo v ozračju presežek pozitivnega naboja? Kako se v nevihtnih oblakih prenaša ta presežek pozitivnega naboja navzgor? Kako nekaj naboja še vedno ostane razdeljenega tudi potem, ko je vreme spet lepo, kljub udarom strel, ki naboj delno izravnajo? Kako nevihte po vsej Zemlji vzdržujejo napetost v ozračju?

Dokončnih odgovorov na ta vprašanja še vedno nimamo. Choji Magono v monografiji o strelah začenja poglavje o razdeljevanju naboja z odstavkom: *Neki šaljivec je rekel, da je o razdeljevanju naboja toliko teorij, kolikor je udarov strel. Eden od razlogov za to obilje teorij je verjetno pomanjkanje opazovanj, posebno znotraj oblakov samih. Drugi pa utegne biti v številnih laboratorijskih poskusih, ki, kakor se zdi, kažejo, da je skoraj vsako dogajanje v vodi, v kateremkoli agregatnem stanju, povezano z naelektrenjem.*

Res poznamo zelo veliko načinov razdeljevanja naboja, ki potekajo na treh ravneh: na ravni molekul, na ravni oblačnih in padajočih delcev (kapljic ali kristalčkov) ter na ravni oblaka. Med prve štejemo pojave, da nastane napetost med točko v vodi in točko v ledu ter med točko v pari (zraku) in



Slika 1.4: Danes najbolj veljavna mehanizma delitve naboja v nevihtnih oblakih: (a) ledeni kristalček za trenutek trči z zrnom ledu (sodre ali toče), se ob njem nabije in odleti navzgor z dvigajočim se zrakom; (b) podhlajene kapljice delno primrzujejo, drobni ostanki kapljic pa dobijo pozitivni naboj ob trku z zrnom ledu. K razdelitvi naboja prispevajo še nekateri drugi procesi.

točko v ledu. Napetost nastane tudi med dvema deloma kristala z različnima temperaturama. V ozračju se naboja ločita pri trkih, ki jim sledi delno spajanje in ponovno ločevanje oblačnih in padajočih kapljic, kristalčkov, zrn sodre ali toče, ki se zaradi različne velikosti in oblike različno hitro gibljejo. Poleg tega se v oblaku dviga in spušča zrak, ki nosi s seboj kapljice in kristalčke. Tisti, ki so dovolj lahki, se gibljejo praktično skupaj z zrakom, torej v vzgornikih navzgor. Tisti pa, ki so dovolj veliki in težki, padajo navzdol. Oboji se ob trkih lahko nabijejo s pozitivnim oz. z negativnim nabojem.

Procesov, ki prispevajo k razdelitvi naboja, je veliko. Večina avtorjev med kakimi dvajsetimi možnimi procesi daje največjo veljavo *influenčno-gravitacijski delitvi naboja* (slika 1.4).

V nevihtnem oblaku so delci različnih velikosti, tekoči in zmrznjeni. V vzgonskih tokovih se manjši delci dvigajo, večji pa padajo. Zaradi električnega polja se v delcih naboj razdeli: spodaj se nabere pozitivni, zgoraj negativni naboj. Večji delci so v nevihtah navadno zmrznjeni. Ledeni kristalček, ki trči v tak delec, se nabije in velikokrat odleti naprej navzgor (slika 1.4 a). Če prileti na ledeni delec podhlajena kapljica, kakršne najdemo v oblakih pri temperaturi precej pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, se ob trku navadno razleti in delno primrzne. Drobni ostanki, ki se razletijo, prejmejo od velikega delca

ob trku pozitivni naboj. Tudi te drobne kapljice odnese vzgornik v višino (slika 1.4 b).

Opisana teorija pojasni nekaj opazovanih dejstev:

1. Glavnina pozitivnega naboja v oblakih je v višjih delih oblakov, nekaj kilometrov nad glavnino negativnega naboja.
2. Glavnina negativnega naboja je v oblaku, kjer je temperatura pod 0°C in kjer so v oblaku veliki ledeni delci, glavnina pozitivnega naboja pa tam, kjer je temperatura še nižja in kjer so le drobni oblačni delci.
3. Naboj se najbolj razdeljuje ob močnih vzgornikih v oblakih.

1.1.3 Udari strel

Slovenija leži na območju, ki je med najbolj nevihtnimi v Evropi, in sicer se od Slovenskega Primorja preko osrednje Slovenije proti Savinjski dolini in Pohorju ter naprej po avstrijskem Koroškem in Štajerskem razteza pas, v katerem je po dolgoletnih opazovanjih v povprečju blizu 50 nevihtnih dni na leto. Tudi števci strel kažejo, da je udarov zelo veliko, posebej izstopa Skalnica nad Gorico.

Največ strel preskoči med deli oblakov. Tu si oglejmo, kaj vemo o strelah iz oblakov na tla ali obratno. V takem udaru strele, ki je lahko dolga tudi nekaj kilometrov in ki ga zaznamo kot en sam blisk, je pravzaprav več zaporednih strel. Kako torej udari strela iz oblaka?

Idealen suh zrak v naravi začne prevajati elektriko, če električna poljska jakost preseže okoli $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Pri povsem enakomerni porazdelitvi napetosti bi bila tedaj pri nekajkilometrski razdalji med oblakom in tlemi za preboj potrebna napetost okrog 10 milijard voltov. V resnici pa strela udari že pri dosti manjši napetosti, in sicer zato, ker se tu in tam pojavljajo neenakomerne porazdelitve naboja, tako da je med dvema takima točkama mnogo višja napetost kot med enako oddaljenima drugima dvema točkama. Izmerili so namreč, da je napetost pred udari strele v povprečju na razdalji 1 metra samo okoli 300.000 V , se pravi desetkrat manj od prebojne vrednosti ali pa še manj.

Zaradi lokalno povečane električne poljske jakosti strela v prvem koraku preskoči razdaljo nekaj deset metrov daleč, za kar potrebuje okrog milijoninko sekunde. Tok pri tem doseže okrog 600 A in z njim se pretoči presežek naboja od oblaka navzdol na mesto bliže tlam. Po času okrog 50

mikrosekunde taka t. i. *vodilna strela* naredi spet nov korak (slika 1.5 b). Ker napreduje na opisani način, jo imenujemo tudi *postopna strela*. Mnogi od krakov te vodilne strele ne najdejo prave poti proti tlom. Ko pa se eden približa tlom na kakih 50 metrov, se navadno pojavi od tal *povezovalni tok* in navzgor udari *povratna ali glavna strela* skozi celotni, že utrti kanal ioniziranega zraka.

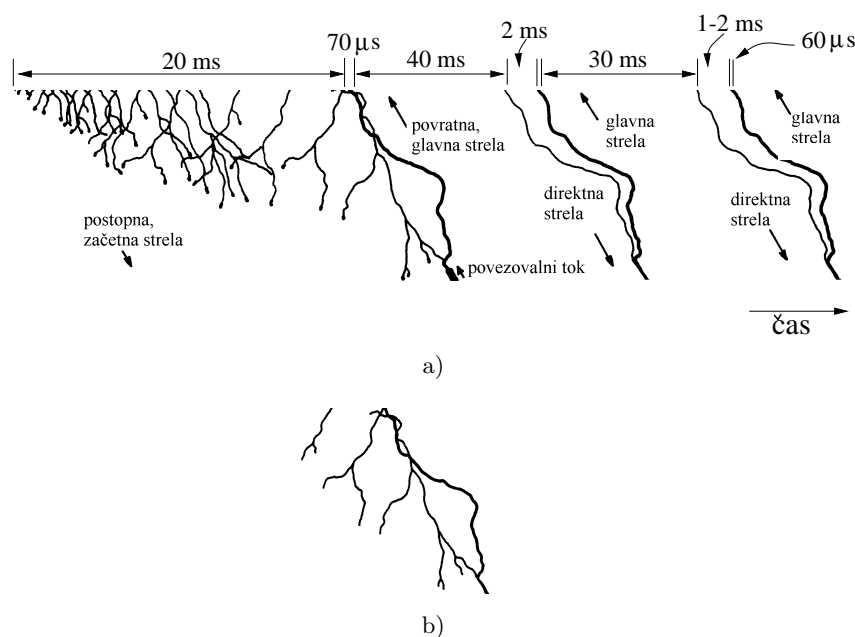
Efektivna hitrost začetne postopne strele je le okrog 150.000 m/s , povratna strela pa skozi ionizirani zrak napreduje dosti hitreje: okrog $50 \cdot 10^6\text{ m/s}$ (okrog šestine svetlobne hitrosti). Tudi tok glavne strele je močnejši, okrog 10 do 20 *kA*, izjemoma celo preko 100 *kA*. Udar se nekajkrat ponovi. Nove začetne strele sedaj ne iščejo poti, saj pride do ponovitve običajno po okrog 0,04 sekunde, ko se ioni še ne povežejo nazaj v molekule. Zato ta ponovni udar *direktne strele* kar plane navzdol. Njena hitrost okrog $2 \cdot 10^6\text{ m/s}$ je vseeno manjša od hitrosti glavne strele. Čez kako tisočinko sekunde sledi spet nova povratna strela in vse se navadno še nekajkrat ponovi. Teh nekaj zaporednih udarov strele traja manj kot pol sekunde.

Zrak se v ioniziranem kanalu segreje na okrog 30.000 stopinj in svetlo zažari kot *blisk*. Tlak močno naraste in se kot *grom* v obliki udarnega vala in zvoka širi navzven od osi strele.

Pri udaru strele se pretoči le malo naboja: tipično okrog 30 *As*. Za primerjavo: to je toliko naboja, kot ga steče skozi stovatno žarnico v eni minuti. Velika energija, ki se sprosti, približno 40 *GJ* (okrog 10.000 *kWh*), torej ni posledica močnega toka naboja, temveč visoke napetosti pri tem.

Odkod izvira ta energija? V nevihtnih oblakih je dovolj. Vertikalne hitrosti v vzgornikih 10 *m/s* so nekaj vsakdanjega. Ko se dviga s to hitrostjo 1 *km³* zraka, torej milijon ton (10^9 kg) zraka, kar ni nič posebnega, je njegova kinetična energija okoli 60 *GJ*. Kapljic je v enem kubičnem metru oblaka okrog 1 gram. Če je torej v enem kubičnem kilometru zraka okrog tisoč ton vode, npr. v višini 5 km od tal, je njena potencialna energija tudi okoli 60 *GJ*. Še neprimerno večja je energija, okrog 3 *TJ*, ki se je sprostila pri tem, ko so kapljice s kondenzacijo nastale iz vodne pare in oddale izparilno toploto; ta je primerljiva z energijo jedrskih bomb. To je več kot dovolj močen vir za kinetično in potencialno energijo, pa še za kakih tisoč udarov strele povrh.

Kje udarjajo strele, ugotavljamo z lokatorji za strele, ki jim učinkovito pomagajo računalniki. Od strele se ne širi samo vidna svetloba, temveč tudi elektromagnetno valovanje najrazličnejših drugih valovnih dolžin, saj naboj, ki se pospešeno premika, oddaja elektromagnetne valove. Posebno sunkoviti



Slika 1.5: Shematičen prikaz postopnega napredovanja začetne strele, glavne povratne strele ter ponovitev, ki se pričnejo z direktno strelo (a), in skica tistega, kar se nam kaže kot en blisk (b) (po Iribarnejju in Choju, 1980).

so radijski valovi, daljši od nekaj metrov. Zanje se pogosto uporablja ime *sferiki*. S sprejemniki, ki zaznavajo prav te sunkovite sferike, se da ločiti elektromagnetno valovanje, ki izvira od strel, od najrazličnejših drugih elektromagnetnih valovanj celo na oddaljenosti do 4000 km od strele. Takšni sprejemniki so torej detektorji strel.

Nenavadna in zanimiva je *krogelna strela*. Ta se pojavi včasih po udaru strele iz oblaka na sorazmerno majhni višini nad tlemi. Svetla kroglja premera kakih 15 cm zažari približno na mestu udara strele v tla, potem pa vijugasto potuje skozi ozračje in se na koncu razleti. Pojav še ni zadovoljivo in dokončno pojasnjen.

Včasih se naboji izravnavajo tudi brez udarov strel, z manjšimi, delnimi razelektritvami. Tak pojav je *Elijev ogenj*, pri katerem iz koničastih predmetov, ki so na tleh ali so s tlemi v električnem kontaktu, izhaja naboj, kar spremljajo majhni plamenčki. Ti plamenčki vsekakor opozarjajo na

močno električno polje in prav je, da Elijev ogenj razumemo kot opozorilo na morebitni udar strele.

1.2 Optični pojavi

Med optične pojave v ozračju štejemo *vidnost* oz. zmanjšano vidnost, *ukrivljanje* svetlobe skozi ozračje, pojave, kot so *mavrica*, ter *hálo*, *venec* okrog Sonca ali Lune, *glorija* okrog sence opazovalca, ki nastane na meglenem morju pod njim, ter svetel *sij na rosi*, spet okrog sence glave opazovalca. Podrobneje bomo v nadaljevanju opisali le mavrico, ostale bomo le na kratko omenili.

1.2.1 Pojavi zaradi sipanja svetlobe

Zmanjšana *vidnost* je v ozračju posledica motnosti ozračja zaradi povečanega števila delcev v zraku. Na delcih, ki so približno tako veliki, kot je valovna dolžina svetlobe, se svetloba siplje, zato je vsak zase vir sipane svetlobe. Vsaka kapljica megle npr. sipa svetlobo na vse stani in deluje kot drobno svetilo. Zato je megla bela. Po drugi strani pa to, da vsaka kapljica "sveti", pomeni tudi, da morebiten črni predmet, če ga gledamo od daleč, ni več viden kot črn, saj je med njim in opazovalcem vse več in več svetlečih se kapljic. Zato vse bolj in bolj izginja v sipani svetlobi. Kontrast črnih predmetov na svetlem ozadju (npr. na nebu) z oddaljenostjo slabi. Ko pade pod določeno mejno vrednost, kontrast izgine in predmeta ne vidimo več. Razdalja, na kateri nam predmeti podnevi niso več vidni, je razdalja vidnosti. Ponoči določamo vidnost tako, da opazujemo zaznavnost luči znanih moči v odvisnosti od razdalje. Opazujemo oslabitev svetlobnega toka od svetila proti opazovalcu, torej drugačen pojav, kot pri vidnosti podnevi. Zato je potrebna uskladitev obeh metod opazovanja, saj želimo tudi ponoči ocenjevati motnost ozračja, ki se ujema s podatkom o vidnosti, ki smo jo ugotovili podnevi.

Velikokrat je vidnost v neko smer dobra, v nasprotno smer pa npr. slabša. *Meteorološka vidnost* je pojem, ki označuje najmanjšo vidnost od vseh vidnosti v katerikoli smeri. Drug pojem, ki je pomemben v letalstvu, je *vidnost vzdolž letališke steze*. Ta ni odvisna le od motnosti ozračja, temveč tudi od opremljenosti letališča: čim boljše so npr. luči, ki označujejo stezo, tem bolje se to stezo vidi ob sicer enako motnem ozračju. Pa še nekaj: ponoči se luči vidijo dlje kot podnevi. Torej je pomembna tudi splošna

svetlost, svetlost ozadja. Zato je vidnost vzdolž letališke steze izračunana količina, ki upošteva motnost, opremljenost letališča in jakost morebitnih luči ter splošno svetlost.

Sipanje svetlobe na molekulah zraka je vzrok, da ozračje vidimo in sicer kot *modro nebo*. Najbolj se namreč sipa svetloba najkrajših valovnih dolžin (Rayleighovo sipanje je sorazmerno λ^{-4}). V vidni svetlobi pripada najkrajša valovna dolžina sicer vijolični barvi, toda njen delež je sorazmerno majhen. Nad vijolično barvo zato prevlada naslednja – modra. Najmanj se sipata oranžna in rdeča svetloba, ki sta na drugem koncu spektra. Ob zahodu Sonca je modra svetloba večinoma razpršena in v direktni sončni svetlobi ostane predvsem rdeča svetloba. Tako so zahajajoče Sonce in od njega osvetljeni hribi ali morebitni oblaki videti rdeči: *večerna zarja*.

Včasih so *glorijo* – barvne kroge na megli ali na oblakih pod sabo z radijem nekaj stopinj, videli le redki (le redki so se vzpenjali na visoke vrhove, nad meglo ali nad oblake). Danes letala redno dvigajo ljudi nad oblake, pa tudi z vzpenjačami se ljudje pogosto dvignejo nad megleno morje pod sabo. Zato dandanašnji pogosto vidimo več barvnih krogov okrog sence letala ali okrog svoje sence. Svetloba se na kapljicah sipa tudi nazaj proti opazovalcu. Sipanje na kapljicah je Mievo sipanje, pri katerem se intenzivnost sipanja v sicer le malo različne smeri močno razlikuje: veliko svetlobe v neko smer, pa manj v le malo drugačno smer, in spet več v še malo drugačno smer. Poleg tega je ta smerna odvisnost intenzivnosti sipanja za različne barve različna: v smer, kamor se npr. najbolj sipa rdeča svetloba, se najmanj sipa modra svetloba. Tako razložimo pojav barvnih kolobarjev.

1.2.2 Pojavi v zvezi z ukrivljanjem žarkov skozi ozračje

Ukrivljanje svetlobe skozi ozračje je posledica tega, da je zrak pri tleh gostejši, kot je višje v ozračju. Zato je tudi lomni količnik pri tleh večji in posledica je, da se svetlobni žarki ukrivljajo navzdol. V zvezi s tem je več pojavov.

Astronomska refrakcija je pojav, da so nebesna telesa navidezno višje, kot je njihov resnični položaj na nebu. Čim bližje obzorju je objekt, tem večja je refrakcija. Ne da bi se tega zavedali, imamo poleg astronomov, z njo opraviti vsi: ko se Sonce ob zahodu navidezno dotakne obzorja, je geometrijsko že pod njim. Zato je dan nekoliko daljši. V zmernih geografskih širinah to niti ni kdo ve kako pomembno, pač pa je npr. na ruski Novi Zemlji polarna noč kar za 15 dni krajša kot bi jo izračunali samo z geometrijskimi

podatki. Poleg tega je refrakcija za spodnji rob Sonca, ki je bliže obzorju, večja, kot je za zgornji. Zato je videti ob zahodu (in seveda tudi ob vzhodu) *Sonce sploščeno*.

Zemeljska refrakcija je podoben pojav: hribi so videti nekoliko višje, kot je njihov resnični položaj. To velja še posebej takrat, ko je pri tleh izrazito mrzlo in je s tem gostota zračnih plasti pri tleh še posebej velika. To se pri nas zgodi ponavadi po prehodu hladne fronte, ki pogosto tudi močno očisti ozračje. Tedaj so okoliški hribi navidezno višji kot navadno, pa tudi vidnost je dobra: občutek imamo, kot da so precej bolj blizu. Geodeti morajo pri optičnih meritvah zemeljsko refrakcijo upoštevati.

Če je plast zraka tik pri tleh močno pregreta, se žarek ukrivlja drugače, in sicer navzgor. Zgodi se lahko, da se žarek od oddaljenih objektov na obzorju ukrivi ob tleh tako, da pride do oči opazovalca. Zato je videz, da se na tleh ti objekti zrcalijo; videti je, kot da so tla mokra. Ker je ukrivljenost le majhna, opazimo pojav le na velikih oddaljenostih od sebe. Potrebno je torej veliko območje brez ovir: npr. dolgi odseki ravne ceste pa lahko vidimo to, t. im. *spodnje zrcaljenje*.

Kadar so zrcaljenja nenavadna, jim rečemo *fata morgana*. Taka zrcaljenja se dogajajo npr., ko se v ozračju po višini izmenjujejo relativno bolj in manj goste plasti, kar se zgodi npr. ob temperaturnih inverzijah v višinah. Zaradi nenavadnih ukrivljanj žarkov so slike oddaljenih objektov tudi zelo nenavadne.

1.2.3 Lom in odboj na kapljicah in kristalčkih – mavrica, hálo in sij na rosi

Podrobneje bomo opisali predvsem pojav dveh *mavric*, ki ju lahko pogosto opazujemo, ko ob soncu za našim hrbtom svetloba prihaja v oko po lomu in odboju na kapljicah: močnejše je vidna mavrica z lokom polmera 42° , šibkeje pa z večjim lokom 50° . Včasih vidimo še *interferenčne mavrice*.

Redkeje (a še vedno nekajkrat letno) je viden mavrici podoben pojav *hálo*: to so ostro razvidni krogi, predvsem dva s polmerom 22° in 46° okrog Sonca, ali le deli takih krogov ter deli tangentnih lokov k tem krogom. *Hálo* nastaja po lomu na kristalčkih v cirusnih oblakih. Vidimo ga, seveda šibkejšega, tudi okrog Lune.

Hála ne zamenjajmo z uklonskim pojavom *vencem* (tega ne bomo posebej opisovali), ki je manjši, od 1° do 10° širok krog, včasih pa skoraj enakomerno svetel disk okrog Sonca ali Lune, in ki nastane zaradi uklona.

Potem je tu še svetel *sij na rosi* okrog sence glave – ta je manj znan, čeprav bi ga lahko opazovali zelo pogosto, če bi bili le pozorni nanj.

Mavrigo poznamo vsi. Malokdo pa ve, da vidi vsak opazovalec svojo mavrico (to velja pravzaprav za vse optične pojave s krožno simetrijo, katere središče je na osi Sonce – glava opazovalca, torej tudi za glorio, sij na rosi, venec in halo).

Mavrigo vidimo, kadar sije sonce izza hrbta na deževne ali umetno razpršene kapljice. V oko opazovalca pride le tista svetloba, ki se je na kapljicah preusmerila nazaj (slika 1.6). Žarek se ob vstopu v kapljico lomi k vpadni pravokotnici. Po odboju (ali, za mavrice višjih redov, po več odbojih) se ob izstopu iz nje še enkrat lomi, tokrat od vpadne pravokotnice. Pri tem se žarkom pri *mavrici prvega reda* z enim notranjim odbojem smer spremeni za:

$$D = 2(\alpha - \beta) + (\pi - 2\beta) \quad (1.4)$$

oz. pri mavricah višjih redov z več oz. i notranjimi odboji pa za:

$$D = 2(\alpha - \beta) + i(\pi - 2\beta). \quad (1.5)$$

K vtisu mavrice prispeva samo svetloba, ki se koncentrira v smeri proti opazovalcu. K svetlosti največ prispevajo žarki, ki se jim smer maksimalno spremeni, za kot D_0 . Ta pogoj za ekstrem formalno pomeni:

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{ter} \quad \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha^2} < 0. \quad (1.6)$$

Fizikalni pomen je naslednji: kljub temu, da vpada svetloba na vso kapljico, da torej veljajo za vpad svetlobe na različne dele kapljice različni vpadni koti, se precejšen del svetlobe preusmeri v neko smer D_0 , pri kateri velja ekstrem $D_0 = \max.$, oz. $\frac{\partial D}{\partial \alpha} = 0$. Še drugače, recipročna vrednost tega pogoja: $\frac{\partial \alpha}{\partial D} \Rightarrow \infty$, nam ta pove, da se svetloba iz sorazmerno velikega razpona vpadnih kotov $\Delta\alpha$ koncentrira v smer okrog D_0 (slika 1.7), kar ustvari svetlo mavrico.

Ker pri okroglih kapljicah velja krogelna simetrija, so poti žarkov osno simetrične glede na os Sonce – glava opazovalca. Zato k mavrici prispevajo kapljice, ki so na stožcu, katerega vrh je v očesu opazovalca, njegov polovični kot pa je odvisen od odklonskega kota D_0 . Polovični kot stožca oz. polmer mavrice je za mavrico prvega reda enak $\pi - D_0$ (slika 1.8), pri mavrici drugega reda pa $2\pi - D_0$.

Za izračun spremembe smeri žarkov ter s tem za izračun kota stožca oz. premera mavrice upoštevamo še lomni zakon:

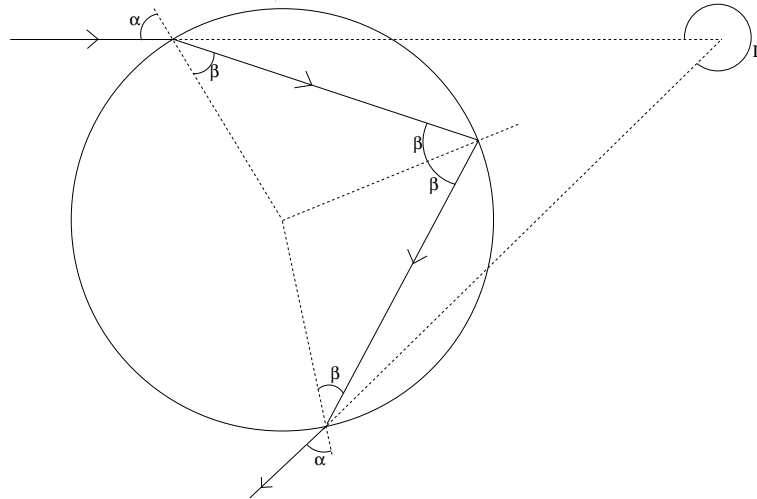
$$\sin \alpha = n \sin \beta. \quad (1.7)$$

* Ko povežemo ta lomni zakon s pogojem o ekstremu $\frac{\partial D}{\partial \alpha} = 0$, lahko izračunamo, pri katerih kotih α , β in D_0 sta hkrati izpolnjena lomni zakon in pogoj o ekstremu. Dobimo $\cos^2 \alpha = \frac{n^2 - 1}{2i + i^2}$. Vrednosti za lomni količnik vode n je približno $n \approx 1,33$ (za zrak je lomni količnik približno enak 1). Za mavrico prvega reda ($i = 1$) velja $\alpha \approx 59^\circ$, $\beta \approx 40^\circ$ in $D_0 \approx 138^\circ$, kar pomeni, da ima mavrica prvega reda polmer $\pi - D_0 \approx 42^\circ$. Za mavrico drugega reda ($i = 2$) pa velja $\alpha \approx 71^\circ$, $\beta \approx 45^\circ$ in $D_0 \approx 310^\circ$, ter za polmer mavrice $2\pi - D_0 \approx 50^\circ$. *

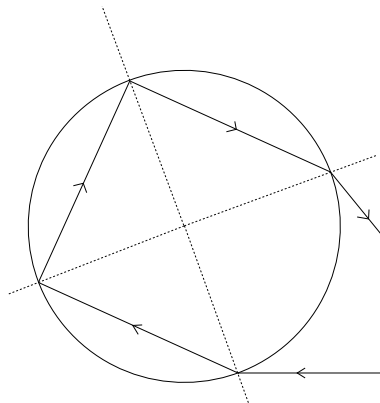
Pri mavrici občudujemo predvsem barve. Svetloba se razkloni v spekter barv zato, ker je lomni količnik n za različne barve različen. Za svetlobo različnih barv veljajo različne spremembe smeri, v skladu z lomnim zakonom $\sin \alpha = n \sin \beta$. To pomeni, da svetloba različnih barv prihaja v naše oko od različnih kapljic: rdeča svetloba od kapljic, ki so pri mavrici 1. reda bolj vstran od smeri Sonce – glava opazovalca, in vijolična od tistih kapljic, ki so bližje, torej na manjšem radiju (slika 1.9). Pri mavrici 1. reda je za rdečo, za katero je lomni količnik vode $n = 1,3311$ lok širok $42,22^\circ$, za vijolično z lomnim količnikom vode $n = 1,3435$ pa $40,36^\circ$. Pri mavrici 2. reda ima rdeča lok širine $50,64^\circ$, vijolična pa lok $53,76^\circ$.

Mavrica prvega reda ima rdečo barvo zunaj in vijolično znotraj loka, mavrica drugega reda, ki je šibkejša, in jo zato redkeje vidimo, nastane okrog mavrice prvega reda, a z obratnim razporedom barv. Med njima je sorazmerno temen pas, od koder ne prihaja kaj dosti svetlobe.

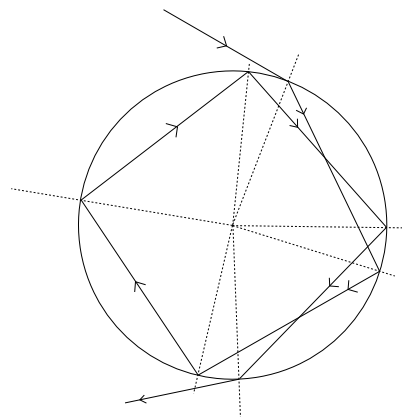
Popolnejši opis mavrice bi moral vključiti še obravnavo jakosti, polarizacije ob lomu in odboju, uklon in interferenco itd. To presega naš okvir; omenimo samo še to, da lahko *interferenčne mavrice* sorazmerno pogosto vidimo ob mavrici prvega reda.



mavrica 1. reda

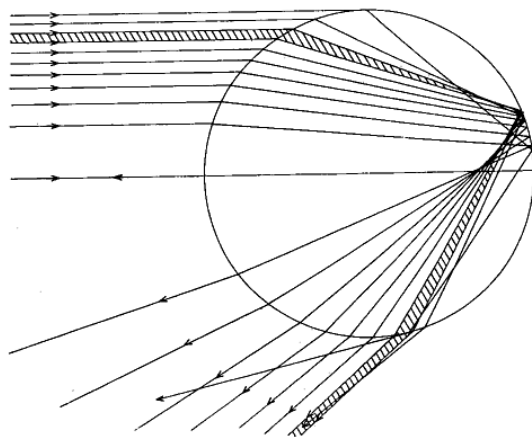


mavrica 2. reda

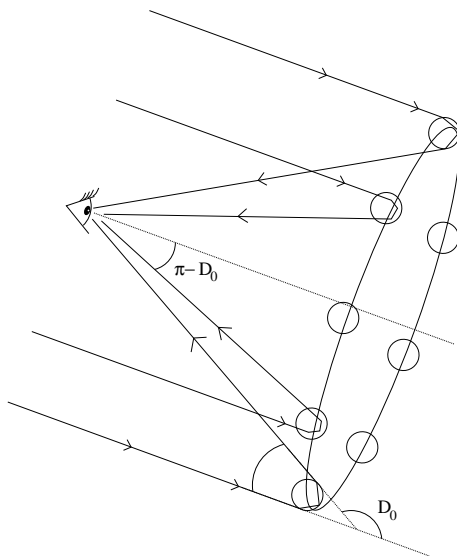


mavrica 5. reda

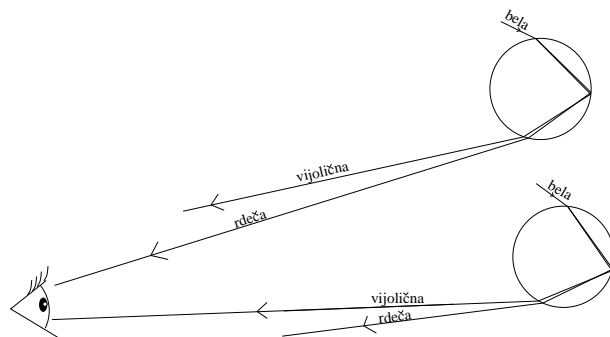
Slika 1.6: Mavrice 1., 2. in 5. reda (z enim, dvema in petimi notranjimi odboji v kapljicah) nastajajo nasproti soncu. Mavrici 1. in 2. reda vidimo pogosto, mavrice 5. reda pa ne, ker je šibka in ker se delno tudi prekriva z mavrico 2. reda. Mavrice 0. reda ni (svetloba se ne koncentrira), mavrici 3. in 4. reda pa nastaneta na tisti strani, od koder sije sonce, zato ju zaradi njegove bleščave ne vidimo.



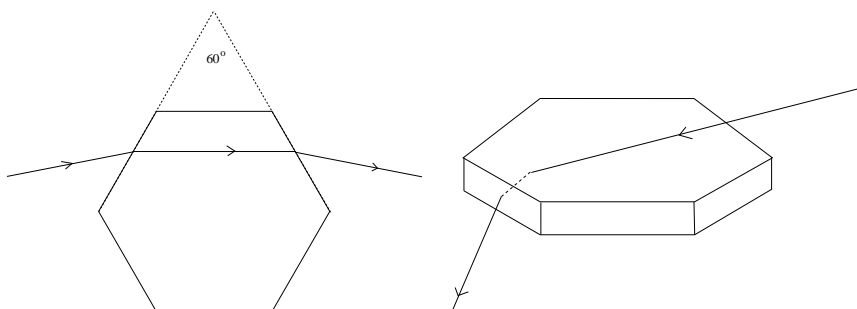
Slika 1.7: Svetloba iz črtkano označenih vpadnih kotov $\Delta\alpha$ se vsa odkloni v približno isto smer. Svetloba iz vseh drugih vpadnih kotov se razpršuje na vse strani (po Trickerju, 1970).



Slika 1.8: K svetlobi mavrice prispeva lom in odboj na kapljicah, ki so na stožcu, katerega vrh je v očesu opazovalca, njegov polovični kot pa je odvisen od odklonskega kota D_0 .



Slika 1.9: Rdeča svetloba pride v oko od drugih kapljic kot vijolična: rdeča od "vijoličnih kapljic" se namreč usmeri drugam, prav tako se vijolična od "rdečih kapljic" tudi usmerja drugam in ne proti opazovalcu.



Slika 1.10: Sprememba smeri žarka pri prehodu skozi ledeni kristalček. Pri prehodu skozi dve nesosednji stranski ploskvi prizme nastaja hálo 22° , pri prehodu skozi osnovno in stransko ploskev pa hálo 46° .

Hálo razložimo podobno kot mavrico. Pri tem je treba upoštevati, da za ledene kristalčke ne velja krogelna simetrija, temveč gre za lom na šeststranih prizmah. Pri hálu tudi ni nobenega notranjega odboja, zato nastane okrog sonca.

Priviligirani so tisti žarki, ki potekajo skozi kristalček simetrično glede na simetralo lomečega kota A kristala – optične prizme (pri mavrici skozi okrogle kapljice sploh ni mogoč nesimetričen prehod). Pri šeststrani prizmi sta kota dva: $A = 60^\circ$ in $A = 90^\circ$ (slika 1.10). Za spremembo smeri pri kotu D_0 , pri katerem se svetloba koncentrira, velja:

$$\sin \frac{D_0 + A}{2} = n \sin \frac{A}{2}. \quad (1.8)$$

Če žarek vstopi skozi stransko ploskev in kristal zapusti skozi drugo, nesosednjo stransko ploskev, dobimo koncentracijo svetlobe v smer, ki je za 22° odklonjena od prvotne. Če pa žarek vstopi skozi osnovno ploskev, se smer spremeni za 46° , (slika 1.10.). Tako nastaneta, če so kristalčki v oblaku naključno orientirani, kroga s premerom 22° in 46° . Če so kristalčki predvsem pokončno orientirani, krog degenerira v dve pegi na obeh straneh Sonca – t. i. sasonci. Če pa so orientirani približno pokončno, se ti dve pegi preoblikujeta v loka. Hálo z notranjimi odboji v kristalčku je šibek, povzroči pa pegi z radijem malo manj kot 90° okrog sonca ali v del kroga razvlečeni pegi. Mogoči so tudi drugi loki, tako da je kompleksni hálo (ki je

v popolnosti le redko viden) kar precej zapleten.

Sij na rosi bomo opisali le na kratko. Brez izpeljave povejmo, da je gorišče debele, povsem okrogle leče na razdalji $\frac{r(n-1)}{n}$ od sredine leče. Tu je r radij leče – v našem primeru kapljice rose, n pa lomni količnik – v našem primeru za vodo $n \approx 1,33$. Torej je $\frac{n-1}{n} \approx 4$ in zato se sončna svetloba zbira na oddaljenosti približno štirih radijev od središča kapljice. Če je tam kak zaslon – npr. kaka travna bilka, je ta močno osvetljena. Svetle pege z množice teh zaslonov se preslikavajo nazaj skozi kapljice – torej pretežno v smeri nazaj proti svetlobnemu viru. Gre torej za odboj predvsem nazaj proti viru svetlobe, s tem pa tudi proti opazovalcu, ki je ravno v osi vpadajočih žarkov. Zato je neko območje okrog sence glave videti precej svetlo: videti je, kot da je okrog sence glave svetel sij.