

Ukrivljen odsev na ravni površini

UKRIVLJEN ODSEV V DVIGALU V STAVBI FIZIKE NA
FAKULTETI ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

↓↓↓

JOŽE RAKOVEC

→ Na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani v stavbi na Jadranski 19 (Fizika) je na kovinskih notranjih stenah dvigala vzorec; izmenjujejo se majhni zglajeni, svetleči se kvadrati in enako veliki motni kvadrati. Stena nasproti vhoda v dvigalo je stekleno zrcalo, na njej je vodoravna svetleča se prečka. Na stropu dvigala so štiri svetilke.

V steklenem zrcalu in na sosednjih pravokotnih stenah (levo in desno od zrcala) se zrcalijo slike kovinske prečke (slika 1). Najbolj je seveda izrazita slika v zrcalu na isti steni, kot je prečka. Na sosednjih pravokotnih stenah se zrcalita tako prečka kot njena slika v zrcalu – torej še po dve ravni sliki prečke (na levi in na desni steni). Na vsaki od stranskih sten pa odseva, če gledamo od zgoraj, še manj svetli in rahlo motni ukrivljeni sliki prečke. Čim nižje gledamo, tem manj sta ti sliki ukrivljeni; če počepnemo, tako da so naše oči v višini prečke, je tudi ta slika ravna.

Vse slike na stranskih stenah nastanejo ob odbojih na »kvadratih«, ki so ornament kovinske stene dvigala. Na zglajenih kvadratih prihaja do močnega zrcalnega odboja in zato do ravnih slik prečke, hrapavi kvadrati okrog njih pa so temnejši. Od hrapavih, motnih kvadratkov je odboj od različno nagnjenih manjših površin razpršen. Ukrivljena slika ni kaj dosti razmazana. To pomeni, da odboj od hrapavih kvadratkov ni enako močan na vse strani, ampak v neke smeri močnejši kot v druge. Zato nekateri od hrapavih kvadratkov »svetijo«¹ proti opazovalcu, drugi pa ne.



SLIKA 1.

Svetleča se kovinska prečka, njena slika v steklenem ogledalu, ravni sliki obeh na levi kovinski pravokotni steni ter nekoliko motna in manj svetla, a še vedno dobro vidna ukrivljena slika prečke.

Podobnost z zgornjim tangentnim lokom hala

Kaj pa, če posvetimo z lučko na steno? Pokažejo se ukrivljeni odsevi (slika 2), ki močno spominjajo na del hala, ki ga včasih vidimo na kristalčkih ledu v cirusnih oblakih na nebu, in sicer na zgornji tangentni lok hala, ki se dotika kroga s premerom 22° (slika 3).

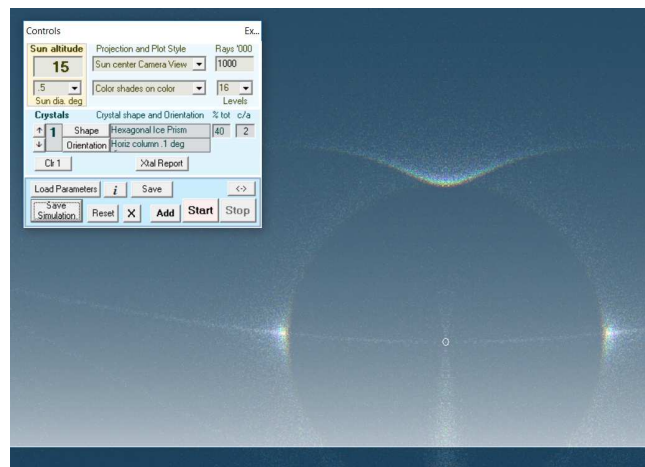




SLIKA 2.

Bolj ali manj konkavna slika lučke na steni dvigala; zgoraj lučka nižje (in/ali bliže steni), spodaj lučka višje (in/ali dlje od stene).

Ker je o halu Presek že večkrat pisal, o njem le na kratko. Halo se na nebu vidi, kadar Sonce sije skozi cirusne oblake. V njih so kristalčki vode (ledu), na katerih se svetloba odbija in lomi. Kristalčki so skoraj vedno heksagonalne prizme, od nizkih šesterorobnih ploščic do višjih stebričkov, le včasih nastajajo tudi razvejane »zvezdice« ali pa piramide in še kaj. Pri nas je halo viden nekajkrat letno. Smer žarkov od sonca se pri prehodu skozi dve ne-sosednji stranski ploskvi prizem, med katerima je kot $\alpha = 60^\circ$, seveda spremeni. Za prehod v ravnini, ki je pravokotna na glavno os kristalčkov, največ svetlobe spremeni smer za okrog 22° . Če so ledeni stebrički povsem naključno orientirani, vidimo samo krog hala. Tangentni lok hala se pokaže takrat, kadar je večina heksagonalnih kristalčkov ledu orientirana bolj ali manj horizontalno (osi prizem so blizu vodoravnici). Osrednji del tangentnega loka se dotika kroga hala, stranski deli loka pa se blizu sredine ukrivljajo navzgor, dlje od sredine pa nazaj navzdol (slika 3).



SLIKA 3.

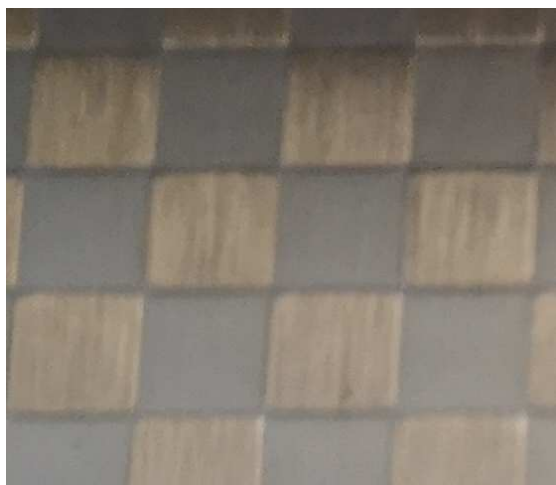
Računalniška simulacija hala s programom HaloSim (www.atoptics.co.uk/halo/download.htm). Lega sonca v sredi kroga hala je samo označena, sicer bi bilo mnogo bolj svetlo. V nastavitvenem oknu je mogoče nastaviti marsikaj, obliko in orientacijo kristalov ledu, razpon teh orientacij, višino sonca na nebu. Za to sliko je izbrano, da je sonce 15° visoko nad obzorjem, da so vsi kristalčki heksagonalne prizme, od teh jih je 25 % naključno orientiranih (na teh nastane krog). Drugi so bolj ali manj horizontalno orientirani: 40 % v horizontalni smeri s standardno deviacijo $\sigma = 0,1^\circ$, 20 % horizontalno s $\sigma = 8^\circ$ in 15 % horizontalno s $\sigma = 5^\circ$. Slika je rezultat prehoda žarkov od Sonca skozi tisoč kristalčkov na nebu. Če so kristalčki morda druge oblike ali pa drugače orientirani, ima halo tudi druge loke. Čim nižje je Sonce na nebu, tem bolj je spodnji rob zgornjega tangentnega loka hala konkaven.

Za to, da ustvarimo sliko hala z računalnikom, je prosto na razpolago nekaj simulacijskih programov, npr. HaloSim (www.atoptics.co.uk/halo/download.htm). S tem programom je narejena slika 3.

Pri programu HaloSim je torej mogoče izbirati, kako visoko na nebu je Sonce in predvsem s tem se oblika zgornjega tangentnega loka močno spreminja. Slika 2 pokaže, da je tudi z odsevom lučke tako. Čim bliže steni je lučka in od čim bolj visoko gledamo, tem bolj konkavno-konveksna je slika. Če je lučka dlje od stene, pa je slika vse bolj konkavna. Ob pogledu z višine lučke pa, kot smo že rekli za prečko, vidimo tudi to sliko ravno.

Kaj se torej naučimo iz primerjave med slikami na steni dvigala s tangentnim lokom hala? To, da morajo biti za izraziti tangentni lok vsi odsevi (pri

halu točneje, dvakratni lomi svetlobe) na približno enako orientiranih kristalih (prizme so »drobna zrcalca«). Ali kaj podobnega velja tudi za hrapave kvadratke v dvigalu? Če pogledamo steno dvigala prav od blizu, vidimo, da je hrapavost motnih kvadratkov dosežena z vertikalnimi praskami. Ker so praske velike v primerjavi z valovno dolžino svetlobe, ne gre za uklonski pojav, ampak za odsev na teh kvadratih – na navpičnih vdolbinah in izboklinah v kovini. Torej gre tudi pri dvigalu za izrazito orientirana »drobna zrcalca« na kovini.



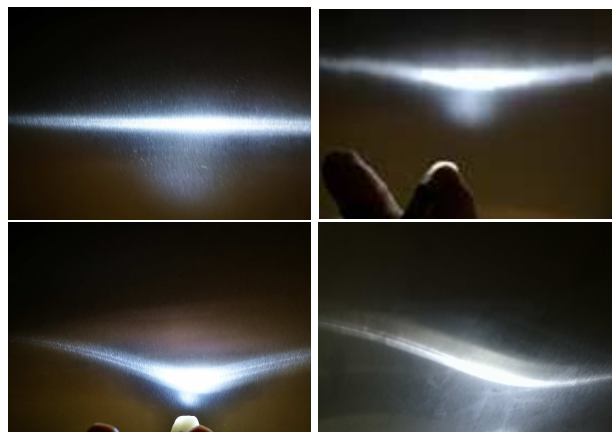
SLIKA 4.

Motnost kvadratkov na steni dvigala je narejena z brušenjem, z navpičnimi praskami v kovini. Slika je narejena ob osvetlitvi od stani, zato se svetloba od gladkih kvadratkov ne odbija proti opazovalcu in zato le-ti izgledajo temni.

Zdi se, da smo bistveno pojasnili: ker so vertikalne raze na brušenih odbojnih ploskvicah stene dvigala vse orientirane v isto smer, dobimo pri odboju na njih sliko, podobno zgornjemu tangencialnemu loku hala na ledenih kristalčkih cirusnih oblakov, ki so tudi orientirani pretežno vsi v isto smer.

Isti pojav na večji brušeni ploskvi

Če so res raze vse v isti smeri, bi morali videti nekaj podobnega na vsaki zrcalni površini z brazdami. Dandanes ima marsikateri prenosnik ali kuhinjski aparat pokrov ali vrata iz brušene svetleče se kovine. Pa pogledjmo!



SLIKA 5.

Odsevi svetlobe lučke od brušene plošče nerjavečega jekla

Zgoraj levo: pogled z iste višine, kot je lučka.

Zgoraj desno: pogled nekoliko od zgoraj.

Spodaj levo: lučka bliže jeklu.

Spodaj desno: pogled nekoliko od zgoraj in od strani.

Nekaj razlage

Zdi se, da je prvi objavljen obsežen opis odbojev svetlobe od valovite ali brazdaste površine knjiga Light and Watter iz leta 1903 barona Sira Montagu-Pollocka: archive.org/details/lightwaterstudy00montuoft/page/n8. V njej je veliko slik odsevov na blago valoviti vodni površini pri različnih smereh valov glede na vir svetlobe (ponavadi Sonce). Valove na spodnji desni strani slike 6 je povzročil čoln, iz katerega je bila posneta fotografija.



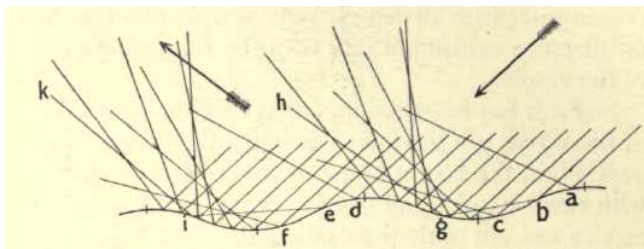
SLIKA 6.

Rahlo valovanje na jezeru Como pri Bellagiu, slika XVII iz Montagu-Pollockove knjige iz leta 1903.



Pollock smeri odseviv od različno nagnjenih delov valov nazorno razloži z risanjem odbojev in grafično pokaže, da gre v neke smeri več svetlobe kot v druge.

Zanimivo je, da se po prvem odboju pol žarkov odbije bolj strmo, pol pa manj strmo navzgor kot pri odboju od ravne površine. Ker pa se nekateri žarki ob prvem odboju preusmerijo tudi navzdol, se le-ti ob odboju na sosednjem valu preusmerijo nazaj navzgor. Zato se od zmerno valovite površine več žarkov odbija bolj strmo in le nekaj bolj položno, kot bi se jih z ravne površine.



SLIKA 7.

Risba odbojev z rahlo valovite vodne površine v najrazličnejše smeri. Opazovalec seveda vidi samo tiste, ki se preusmerijo proti njemu. Slika je iz Montagu-Pollockove knjige iz leta 1903.

Ali bi morda tudi sami poskusili določati smeri odbojev z rahlo valovite površine? Za deset ali dvajset odbojev vzdolž valovne dolžine, recimo na vsakih $2\pi/10$ ali $2\pi/20$? Določanje nagibov sinusne funkcije res ni težko, tudi določanje nagibov pravokotnic nanjo ne – so za 90° večji. Ko poznamo smeri pravokotnic, tudi določanje smeri prvič odbitih žarkov ni težko. Malo več pazljivosti pa je potrebno pri določanju morebitnih drugih odbojev. Do teh lahko pride pri tistih prvih odbojih blizu vrhov in dolin valov, ko se žarki preusmerijo nekoliko navzdol. Treba je ugotoviti, kje tak žarek zadene sosednji val. Kam gre drugi odboj, pa je spet odvisno od smeri pravokotnice na tistem mestu.

V Montagu-Pollockovi knjigi je opisan in narisani tudi eksperiment, ki v laboratoriju ponazarja opažanja iz narave, in sicer s slikami odseviv na šipi, ki leži na mizi pred prižgano svečo. Čez šipo, na-

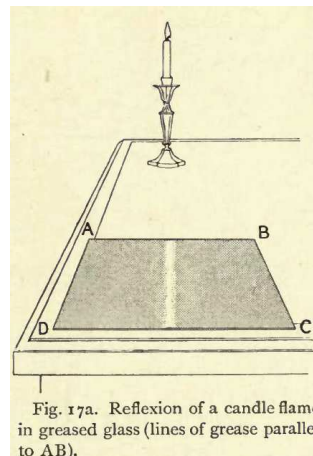


Fig. 17a. Reflexion of a candle flame in greased glass (lines of grease parallel to AB).

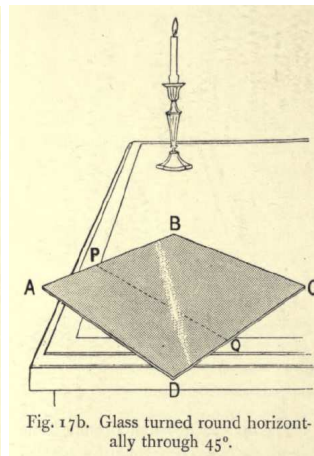


Fig. 17b. Glass turned round horizontally through 45° .

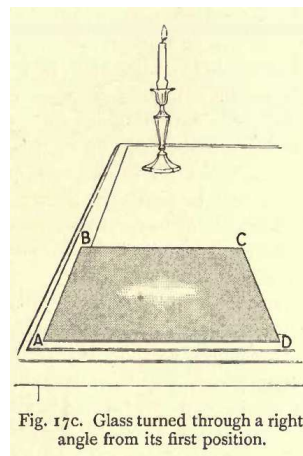


Fig. 17c. Glass turned through a right angle from its first position.

SLIKA 8.

Odsevi sveče na šipi s črtami iz vazelina iz knjige M. Pollocka (1903): levo zgoraj – črte pravokotne na smer pogleda proti sveči, desno zgoraj – zasukane za 45° in spodaj – črte v smeri pogleda proti sveči.

mazano z vazelinom, položimo kos blaga in ga potegnemo preko šipe. Na ta način nastanejo vzdolž potega tanke ravne vzporedne brazde. Če so le-te pravokotne na pogled proti sveči (slika 8, levo zgoraj), je odsev od sveče raven in naravnost proti nam. Kadar je šipa nekoliko zavrnjena (slika 8, desno zgoraj), se tudi odsevu spremeni smer. Če pa so črte vzdolž pogleda proti sveči, je odsev tudi približno pravokoten in nekoliko razmazan (slika 8, spodaj).

Pomembno je poudariti, da se ob zavrtitvi šipe smer odseva spremeni za dosti manj od kota zavrtitve. Ta poskus s črtami na šipi je po Montagu-Pollocku v svoji knjigi *Light and Color in the Outdoor* (1974), ki sicer opisuje še mnoge druge pojave v zvezi s svetlobo v naravi, povzel tudi Marcel Minnaert, ki pa še leta 1974 pravi, da vse podobnosti tega pojava še niso pojasnjene, a da bistvo vseeno razumemo.

Leta 2011 so David K. Lynch, David S. P. Dearborn in James A. Lock opisali različne odseve svetlobe na morski površini, med njimi tudi fotografijo in računalniško simulacijo ukrivljenega odseva od sonca. Tudi oni so upoštevali več kot 100 let stare slike in razlage iz Pollocka in tako kot on razlagajo pojav odboja na blagih sinusnih valovih na vodi z največjo strmino valov α . Pokažejo, da gredo vsi odbiti žarki pri poševnem vpadu v razpon kotov, širok 4α . Pri pravokotnem vpadu je to od -2α do $+2\alpha$, pri poševnem pa od α_0 do $\alpha_0 + 4\alpha$. Njihova fotografija kaže odsev nizkega Sonca, ki je v daljavi raven (od povsem neurejenih valov). Blizu opazovalca, ki pluje na čolnu, so valovi od premca čolna dokaj urejeni in klinasto odklonjeni od smeri plutja čolna (torej podobno kot pri Pollockovi sliki z jezera Como). Poleg te fotografije pa je še slika, dobljena z računalniško simulacijo. Tam, kjer se pojavijo urejeni valovi, se odblesk sonca na morski gladini ukrivi. Spet so torej vzrok za ukrivljanje slike urejene brazde – v tem primeru valovi. Če torej računalniška simulacija verno ponazori prizor iz narave, potem so v njej zagotovo upoštevani pravi algoritmi. Svetloba se odbija v različne smeri, ampak samo v vpadni ravnini, ker so valovi (brazde) dolgi.



SLIKA 9.

Fotografija ukrivljenega odseva na morski površini.



SLIKA 10.

Računalniška simulacija tega pojava, iz Lynch in sod. (2011), dosegljivo tudi na engagedscholarship.csuohio.edu/sciphysics_facpub/104/. Sliki 9 in 10 sta objavljeni z dovoljenjem prvega avtorja D. Lyncha.

Še enkrat o halu

Prve omembe hala so že iz antike, zelo natančno pa je pojav hala v Sant Petersburgu 18. junija 1790 opisal Tobias Lowitz. Petdeset let kasneje je halo opisal, razložil in podal nekatere glavne enačbe o njem Auguste Bravais, fizik in pomemben mineralog v svoji obširni razpravi iz leta 1847 (www.ursa.fi/blogi/ice-crystal-halos/an_old_halo_book_available/). Že takrat je med drugim vpeljal prilagojeni lomni količnik $n' = \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta} / \sin \theta$ za prehode žarkov skozi ledeni kristal v ravnini, ki ni pravokotna na glavno os kristala, kar še danes uporabljajo, npr. tudi Walter Tape za analitično obravnavo oblik hala (1980). Walter Tape obravnava različno orientirane prizmatične kristale ledu in za vsakega





definira smer glavne osi $\mathbf{O}$ (to je smer, pravokotna na osnovno ploskev prizme), smer proti Soncu $\mathbf{S}$ ter smer normalne $\mathbf{n}$ na vpadno ploskev prizme ter kote med temi smermi, npr. kot θ med $\mathbf{S}$ in $\mathbf{O}$, vpadni kot, itd. Nabor vrednosti vseh kotov je omejen, saj pri nekaterih vpadih žarek na izstopni ploskvi ne more ven iz kristala (mejni kot totalnega odboja). Če so torej intervali vseh možnih vrednosti kotov omejeni, je omejena tudi možnost spremembe smeri žarkov Δ , ki torej tudi obsega samo omejeno območje vrednosti. Kako je potem Tape to območje Δ »preslikal« na nebesno kroglo, pa presega običajno težavnost opisov v Preseku. Seveda pa so danes na razpolago tudi numerične simulacije, kakršna je že omenjena Halo-Sim.

Še nekaj odsefov svetlobe

Če nimate pri hiši nobene ravne ploskve iz brušene kovine, bi morda lahko pogledali odsev luči na pravnem rešetkastem kovinskem predpražniku, toda le na takšnem, ki ima vzdolžne brazde. Če bi bile kovinske palice predpražnika idealno gladke (brezhibno zrcalo), bi namreč odboja vstran sploh ne bi bilo. Ker ima površina palic pri predpražniku na sliki 12 brazde (da na njih manj drsi), njegove od svetilke osvetljene palice svetijo tudi v druge smeri.

Če ni v vaši bližini nobenega takšnega predpražnika, pa lahko občudujete sliko na kakšnih rahlo upognjenih kovinskih žaluzijah na svoji ali sosednji hiši. A le težko boste našli tako lep odsev, kot je s stene stavbe, prekrite z žaluzijami na sliki 13.

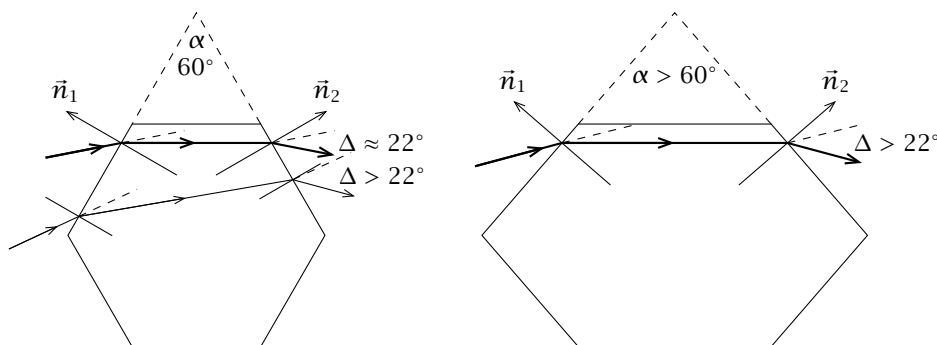
Zakaj ima glavni krog hala polmer 22° ?

Prehod žarkov skozi kristal ledu, skozi heksagonalno prizmo, je najpreprosteje opisati za prehod v ravnini, ki je pravokotna na glavno os kristala. V tej ravnini je presek kristala enakostranični šesterkotnik. Pri različnih vpadnih kotih se sicer žarki preusmerjajo v različne smeri (leva slika 11), a največ se jih v približno isto smer preusmeri pri simetričnem prehodu, zato gre v to smer največ svetlobe (debelejše označeni žarek na levi sliki 11). Pri tem je sprememba smeri žarkov najmanjša, in sicer malo manj kot 22° . Tak je torej pri povsem naključno orientiranih heksagonalnih ledenih prizmah tudi polmer notranjega roba obroča hala. Zaradi lomov ob drugačnih vpadnih kotih krog ni tanka črta, ampak obroč z ostrim notranjim robom. Lahko je pre-

hod sicer pravokoten na os kristala, a nesimetričen (tanki žarek na levi sliki 11).

Pri »poševnem« preходу v kaki drugi ravnini, ki ni pravokotna na glavno os kristala, temveč kot med vstopnim žarkom in to glavno osjo kristala $\theta \neq 90^\circ$, je slika šesterokotnika prečno raztegnjena (desna slika 11). Zato je kot med dvema nesosednjima ploskvama večji od 60° in posledično tudi preusmeritev žarkov pri simetričnem prehodu večja od 22° .

Pri prehodu skozi eno stransko in eno osnovno ploskev prizme lahko nastane tudi krog s polmerom 46° . Ker so lahko kristali tudi še kako drugače orientirani ali pa niso heksagonalne prizme, ima včasih halo veliko dodatnih lokov in peg. Tak je bil npr. halo, ki ga je opisal Lowitz. In če se je kaj takega videlo na nebu, so ljudje rekli: »Znamenja so na nebu, vojska bo ...«.



SLIKA 11.

Lom svetlobe pri prehodu skozi šeststranično prizmo; levo – v ravnini, pravokotni na glavno os prizme in desno v ravnino poševno glede na glavno os prizme.



SLIKA 12.

Ukrivljen odsev na predpražniku v veži ob odprtih vratih, skozi katera od leve zgoraj prihaja svetloba cestne svetilke, v okvirčku pa brazde na kovinskih palicah. Odsev opazujemo približno v smeri kovinskih letev predpražnika.

Za konec

Naj povzamemo. Ponavljajoče se odsevne »črte«: razce, brazde ali valovi, imajo v svoji mikrostrukturi različne nagibe vdolbin in izboklin (ledeni kristalčki pa različne orientacije vpadnih in izstopnih ploskev). Zato odbijajo svetlobo glede na kot med vpadnim žarkom in normalo na to mikro odbojno ploskev. Do opazovalca pridejo iz nekega območja odsevne ravnine (na nebu pa iz nekega območja nebesne krogle) samo tisti žarki, katerih sprememba smeri je ravno pravšnja, da se preusmerijo proti opazovalcu. Zato so odsevi tudi iz ravnih ploskev s črtami pri pogledu od strani lahko ukrivljeni.

Pojav je v podrobnostih drugačen, kot je odboj od ukrivljene površine. Rezultat pa je podoben: v vsaki smeri pogleda se namreč v vdolbinah ali na izboklinah brazd z različnimi nagibi najde kak nagib, ki je enak nagibu dela enakomerno ukrivljene ploskve v tej isti smeri.

Tiskani viri, ki so posebej navedeni v nadaljevanju, so vsi dostopni tudi na spletu, a ne vsi brezplačno. Drugi, netiskani internetni viri so navedeni samo med tekstem. Do vseh smo dostopili 22. 6. 2019.



SLIKA 13.

Ukrivljeni odsev sonca na steni javne knjižnice v Strasbourgu, prekrite z nekoliko zaobljenimi žaluzijami (www.paraselenne.de/?uk:127313). Objavljeno z dovoljenjem avtorice slike E. Seidenfaden.

Literatura

- [1] A. Bravais, *Mémoire sur les Halos*, Extrait du Journal de l'École royale Polytechnique, XXXIe Cahier, xii+266pp+IVpl, 1847. www.ursa.fi/blogi/ice-crystal-halos/an-old-halo-book-available/.
- [2] D. K. Lynch, D. S. P. Deaborn in J. A. Lock, *Glitter and Glints on Water*, Appl. Opt. **50** 2011, 39-F49, engagedscholarship.csuohio.edu/sciphysics_facpub/104/.
- [3] M. Minnaert, *Light and Color in the Outdoors*, Springer; Corrected edition (April 13, 1995, 449 pp, www.springer.com/gp/book/9780387979359).
- [4] Sir Pollock-Montagu, *Light And Water: A Study Of Reflection And Color In River, Lake And Sea*, London, George Bell and Sons, xii+115 pp, 1903. Ponatis oktobra 2009 pri Kessinger Publishing, LLC, archive.org/details/lightwaterstudy00montuoft/page/n8.
- [5] W. Tape, *Analytic foundations of halo theory*, J. Opt. Soc. Am. **70** 1980, 1175-1192, www.osapublishing.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-70-10-1175.

× × ×