

Ledo kristalų halai atmosferoje

Audrius Dubietis, Ričardas Balčiūnas

Žodis “halas” yra kilęs iš graikų kalbos ir reiškia švytintį ratą aplink šviesulį. Tik nedaugelis atmosferos halų yra išties apskriti. Dažniausiai – tai spalvingos ar bespalvės dėmės, taškai, lankai, puslankiai, švytintys danguje. Halai yra kur kas dažnesnis atmosferos reiškiny, nei atrodytų iš pirmo žvilgsnio. Akyliausi stebėtojai teigia, kad įvairūs halai gali būti matomi net iki 200 kartų per metus¹. Ryškūs halai neretai yra painiojami su vaivorykštėmis, klaidingai manant, kad tai – vaivorykštės fragmentai. Pažymėtina, kad vaivorykštė visada matoma priešingoje pusėje nei Saulė, na o spalvingi halai, kaip taisyklė, matosi tik Saulės kryptimi. Gaila, tačiau dauguma halų atsiranda ir išnyksta nepastebėti, kadangi instinktyviai kreipiame akis tolyn nuo akinančių Saulės spindulių.

Halai kaip atmosferos reiškiny buvo žinomi nuo senų senovės, o sisteminiai stebėjimai, atkreipiant dėmesį į jų formų įvairovę, pradėti apie 17 a. vidurį. Vieną seniausių halų mokslinių aprašymų dar 1630 m. pateikė C. Šeineris. Jis kruopščiai aprašė aplink Saulę išsidėsčiusius švytinčius apskritimus, lankus ir taškus. Šeinerio stebėtas halas buvo toks retas ir neįprastas, kad kai kurios jo detalės paaiškintos tik žymiai vėliau – 20 a. pradžioje². Bene didingiausią to laikmečio kompleksinį halą 1661 m. vasario 20 d. Gdanske stebėjo ir aprašė astronomas J. Hevelijus. Reginys buvo toks įspūdingas, kad vėliau buvo pavadintas “septyniomis Danzigo Saulėmis”³.

1637 m. R. Dekartas paskelbė vieną žymiausių savo laikmečio darbų, pavadintą “Diskursas apie Metodą, kaip teisingai suprasti priežastis ir ieškoti tiesos moksluose”. Veikalą sudarė trys dalys – Dioptrika (arba optika, kaip dabar mes tą suprantame), Geometrija ir Meteorologija. Įdomu tai, kad būtent šie mokslai ir yra tie kertiniai akmenys, ant kurių pamato vėliau buvo sukurta šiuolaikinė halų teorija. Dekartas panaudojo šviesos lūžio dėsnius meteorologijoje ir atkreipė dėmesį, kad halai niekada nematomi lyjant lietui ar krintant rūkui, tad jie nieko bendro neturi su vandens lašais ir vaivorykštėmis. Atvirkiščiai, Dekarto teigimu, halai matomi tik giedru oru, kai dangų dengia permatomi plunksniniai debesys. Kadangi halų švytėjime stebimas tam tikras spalvų išsidėstymas, Dekartas spėjo, kad halų priežastis galėtų būti šviesos refrakcija ledo kristaluose, iš kurių, jo manymu, ir sudaryti plunksniniai debesys. Ši Dekarto mintis buvo išties toliaregiška, kadangi anuomet debesys buvo menkai pažįstami ir net nebuvo klasifikuoti – iki to dar buvo likę daugiau nei pusantro šimtmečio. Nežinoma buvo nei plunksninių debesų sandara, nei aukštis, kuriame šie debesys formuojasi. Dekarto idėjas toliau išplėtojo žymus prancūzų fizikas E. Mariottas (kurį geriau žinome iš atrasto dujų dėsnio). 1681 m. jis parodė, kad paprasčiausi ir dažniausiai stebimi halai išties yra sąlygojami šviesos spindulių lūžio ledo kristaluose, o juos aprašyti galima remiantis geometrinės optikos dėsniais. Dekarto ir Mariotto pasiūlyta metodologija atmosferos optikoje tebėra taikoma ir šiandien⁴. Būtent remdamiesi Dekarto ir Mariotto darbais, šimtmečiu vėliau G. Venturis Italijoje ir T. Jungas Anglijoje padėjo mokslinės halų teorijos pagrindus. Halus savo laiku stebėjo ir aprašė tokios iškilios mokslo asmenybės kaip Tycho Brahė, C. Hiuigensas ir Fraunhoferis. Žymusis anglų astronomas E. Halis taip

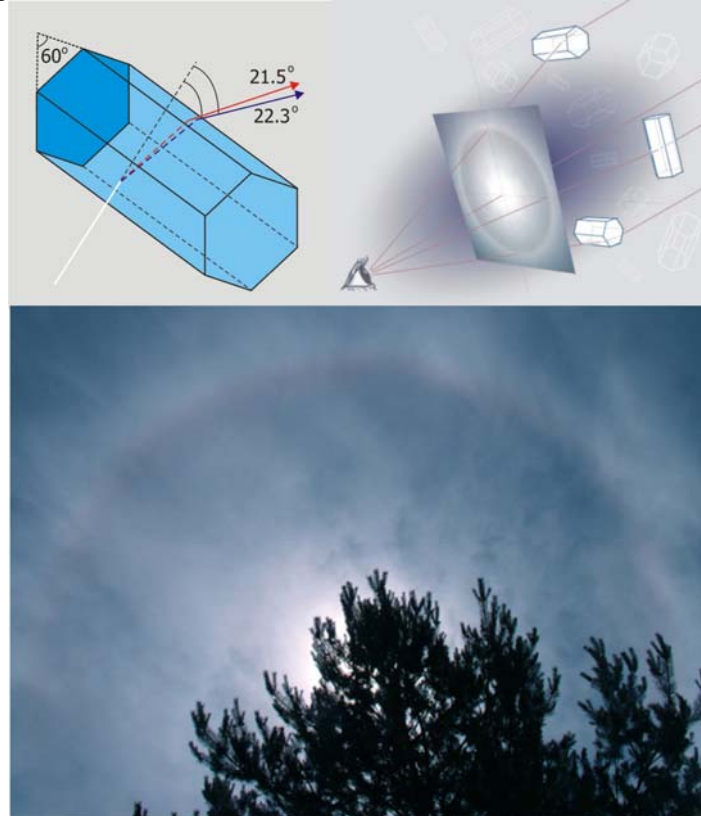
pat buvo ir aistringas halų stebėtojas bei tyrinėtojas. Iki šiol išlikę nemažai jo laiškų, siųstų Karališkajai Mokslo Draugijai, kuriuose jis aprašė savo stebėjimus ir pastebėjimus⁵. Didingi halai, sudaryti iš dešimčių ryškių fragmentų buvo stebėti 1790 m. Sankt Peterburge (T. Lowitzas) ir 1849 m. Tartu (Medleris ir Klausenas)⁶.

Pirmąją, bendresnę teoriją, sistemiškai apibendrinusią daugelį to meto stebėjimų, 1845 m. sukūrė A. Bravė, kuris laikomas vienu šiuolaikinės kristalografijos pradininkų. Bravės teorija pilnai atitiko ano laikmečio dvasią ir žinių lygį, tačiau joje buvo likę nemažai spragų ir netikslumų. Atsiradus fotografijai, halų stebėjimai buvo pakylėti į kokybiškai naują lygmenį. Žinias apie halus bei jų formų įvairovę žymiai praturtino ir poliarinės ekspedicijos. Šių stebėjimų rezultatai buvo nuolat skelbiami prestižiniame Amerikos meteorologų draugijos leidžiamame žurnale „*Monthly Weather Review*“, tačiau 1918 m. žurnalas šias publikacijas nutraukė, pasipylus daugybei menkaverčių stebėjimų. XX a. pradžioje halų teoriją papildė ir išstobulino L. Bessonas, Č. Hastingsas, E. Woolardas ir kiti, įtraukdami ir retų bei labai sudėtingų halų paaiškinimus⁷. Pilnutinę halų teoriją tik visai neseniai (1999 m.) užbaigė W. Teipas ir G. Kionenas, sudarydami išsamų halų atlasą, kuriame, įskaitant visas ledo kristalų modifikacijas ir šviesos spindulių optinius kelius, priskaičiuojama iki 50 skirtingų halų tipų⁸. Dauguma jų yra grynai teoriniai ir niekada nestebėti realiomis sąlygomis.

Plunksniniai debesys, ledo kristalai ir halai

Dar Dekartas pastebėjo, kad halai randasi dangų dengiant permatomiems plunksniniams debesims. Šie debesys yra aukščiausi troposferos debesys. Ties ekvatoriumi plunksniniai debesys iškyla net į 12-15 km aukštį, o vidutinėse platumose jų aukštis svyruoja nuo 8 iki 10 km ir šiek tiek priklauso nuo metų laiko. Oro temperatūra tokia aukštyje nukrenta iki -50°C , todėl plunksniniai debesys, skirtingai nuo kamuolinių ar pluoštinių debesų, yra sudaryti vien tik iš ledo kristalų. Idealūs ledo kristalai yra taisyklingos šešiakampio formos, arba heksagoniniai⁹. Plunksniniai debesys formuojasi išilusio drėgno oro masėms kylant aukštyn ir vėstant. Vandens garai kondensuojasi virsdami ledo kristalais. Augdami šie kristalai paprastai įgauna plonų šešiakampių plokštelių ar adatėlių (veikiau strypelių) pavidalą. Tuo nesunku įsitikinti atidžiau patyrinėjus apšerkšnijusią žolę po šaltos ir giedros nakties. Taisyklingiausi ledo kristalai susiformuoja tik tada, kai jie auga lėtai, taigi tam didelės įtakos turi aplinkos sąlygos – slėgis, temperatūra ir drėgmė. Plokštelių formos kristalai paprastai susidaro esant maždaug -20°C temperatūrai, o strypeliai ar netaisyklingų formų polikristalai formuojasi esant žemesnei arba aukštesnei temperatūrai. Ne mažiau svarbų vaidmenį vaidina ir kondensacijos centrai – atmosferoje pasklidusios smulkios dulkelės, aerozoliai ar net atskiros neorganinių druskų molekulės. Vykstant kondensacijai, šių centrų cheminė sudėtis nulemia elektrocheminius procesus, kurie savo ruožtu įtakoja būsimų ledo kristalų galimą formą bei dydį¹⁰. Įvairiais stebėjimais nustatyta, kad taisyklingiausi ir didžiausi ledo monokristalai užauga vandens garams kondensuojantis ant palyginti didelių jūros druskos dalelių ar tam tikros sudėties dulkių. Tačiau kai kondensacijos centrais tampa sieros rūgštis ar sulfatų junginiai, kurie plačiai pasklidę atmosferoje dėl ugnikalnių veiklos, ledo kristalai, kaip taisyklė, būna arba netaisyklingos formos arba labai maži.

Laikui bėgant ir keičiantis aplinkos sąlygoms, kristalai ima garuoti nesilydydami (toks procesas vadinamas sublimacija) ar įgauna sudėtingesnes formas, virsdami polikristalais, o galiausiai ir mažytėmis snaigėmis, kuriose taip pat galima išžiūrėti šešiakampės simetrijos elementų. Sublimacijos pasėkoje taisyklingų šešiakampių briaunos dyla, o kristalai virsta apvalinomis nodulėmis, kurios viso labo tik sklaido šviesą¹¹.



Taisyklingų ledo monokristalų dydis svyruoja nuo 25 mikrometrų iki 0.25 mm (1 mikrometras = 0.001 mm)¹². Gerai žinoma, kad prizme galima išskaidyti baltą Saulės šviesą į sudedamąsias spalvas – spektrą. Ledo monokristalai, panašiai kaip ir mažytės prizmės, laužia ir atlenkia Saulės šviesos spindulius. Kampas, kuriuo atlenkiami šviesos spinduliai, priklauso ne tik nuo prizmės viršūnės kampo, bet ir nuo pačių spindulių kritimo kampo. Tačiau kiekvienai prizmei egzistuoja vadinamasis mažiausio nuokrypio kampas. Paprastai tariant – tai mažiausias įmanomas spindulių atlenkimo kampas, kuris keičiant spindulių kritimo kampą (ar pačios prizmės orientaciją) tik didėja. Heksagoninių ledo kristalų briaunos atitinka prizmes su 60° ir 90° viršūnės kampu, taigi tokių prizmių mažiausio nuokrypio kampai yra atitinkamai 22° ir 46°¹³. Tai yra pagrindiniai kampai, kuriais stebimi halai. O kadangi ledo lūžio rodiklis priklauso ir nuo šviesos bangos ilgio (spalvos), tai ir mažiausio nuokrypio kampai skirtingoms spalvoms šiek tiek skiriasi. Beje, mėlyni šviesos spinduliai yra atlenkiami mažesniu, o raudoni – didesniu kampu (1 pav.).

Halus stebime tik tada, kai dangų dengia iš taisyklingų formų ledo kristalų sudaryti plunksniniai debesys. Taisyklingiausi halai formuojasi, kai dangų dengia ištinis permatomų plunksninių-pluoštinių (*cirrostratus*) debesų šydas. Šie debesys dažniausiai susidaro artėjant atmosferos frontams, tad ir halai neretai laikomi orų kaitos pranašais.

Kai plunsniniai debesys esti daugiasluoksniai, juose galima rasti ne tik įvairių dydžių, bet ir formų ledo kristalų, tada stebime išpūdingus kompleksinius halus. Halų morfologija (formų įvairovė) yra be galo turtinga, o visi halai sąlyginai gali būti skirstomi pagal tai, kurie kristalo kampai laužia šviesą ir kaip tie kristalai orientuoti erdvėje (tvarkiai ar chaotiškai)¹³. Tai – refrakciniai halai, juose aiškiai matome Saulės spektro spalvas. Kol ledo kristalai yra labai maži (25-50 mikrometru), jų briaunos lygiagrečių Saulės spindulių pluošto atžvilgiu yra orientuotos chaotiškai. Taigi debesyje yra tikra mažyčių ledo prizmių maišalynė. Būtent dėl chaotiškos ledo prizmių orientacijos matomi koncentriniai halai, kurių centre yra Saulė (1 pav.). Tokie yra mažasis (22°) ir didysis (46°) halai. Kristalams augant, vis stipriau reiškiasi sunkio jėga, ir jie ima kristi žemyn kelių dešimčių centimetrų per sekundę greičiu¹⁴. Dėl aerodinaminių jėgų atsiranda tam tikra kristalų orientacija. Kaip taisyklė, kristalai orientuojasi taip, kad pasipriešinimo jėga būtų didžiausia (štai čia pirmųjų halų teorijų kūrėjai klydo, manydami, kad yra atvirksčiai)¹⁵. Tokiu būdu plokštelių formos ledo kristalai orientuojasi taip, kad vidutinė jų plokščiosios pusės padėtis tampa lygiagreti Žemės paviršiui. Tokie kristalai leidžiasi žemyn siūbuodami į šonus kaip medžio lapai ramią rudens dieną. Strypeliai taip pat orientuojasi ilgąja ašimi horizontaliai Žemės paviršiui, neretai įgaudami ir sukamąjį judesį aplink savo trumpąją ašį. 50-100 mikrometru dydžio kristalai yra dalinai orientuoti, o 200 mikrometru ir didesni – jau pilnai orientuoti. Orientuotų ledo kristalų kuriami halai yra žymiai sudėtingesni, o kai kurie iš jų labai spalvingi ir ryškūs. Tai – parheliai, zenitinis ir tangentiniai lankai. Orientuoti ledo kristalai kuria ir atspindžio halus – Saulės stulpus ar parhelinį ratą. Šie halai yra bespalviai (balti), nes Saulės šviesa yra tiesiog atspindima taisyklingų orientuotų kristalų briaunų. Kuo tvarkingesnė kristalų orientacija, tuo ryškesnis jų kuriamas halas. Orientuotų ledo kristalų sąlygojamų halų forma ir ryškumas priklauso nuo Saulės aukščio virš horizonto. Beje, ryškiausi halai stebimi, kai plunksninių debesų sluoksnis yra plonas (optinis tankis <1), nes būtent ploname debesų sluoksnyje yra išvengiama daugkartinės šviesos sklaidos efektų, kurie sulieja vaizdą¹⁶. Dažniausiai matomi yra 22° halas ir jo viršutinis bei apatinis tangentiniai lankai, parheliai, parhelių ratas, zenitinis lankas ir Saulės stulpas. Šie 7 halai sudaro daugiau kaip 95% visų stebimų halų reiškinių, o daugiau nei pusė iš jų visų tenka 22° halui ir parheliams³.

Koncentriniai halai

Bene dažniausiai iš visų halų matomas 22° halas, dar vadinamas mažuoju halu (1 pav.). Tai švytintis ratas apie Saulę, kurio spindulys yra maždaug 22° , o skersmuo – 44° . Dažniausiai matomi tik šio halo fragmentai, priklausomai kaip tolygiai dangų dengia debesys. Paprastai šį halą sunkoka įžiūrėti dėl akinančios Saulės šviesos. Tačiau “paslėpus” Saulę už namų, medžių ar kitų kliūčių, ar tiesiog žiūrint pro Saulės akinius, mažasis halas tampa gerai pastebimas. Šį halą kuria Saulės šviesa, atlenkiama chaotiškai erdvėje orientuotų mažyčių strypelių formos ledo kristalų. Dėl skirtingo raudonų ir mėlynų spindulių halo vidinė pusė yra rausva, o išorinė – melsva. Atlenkimo kampų skirtumas bei Saulės regimasis skersmuo apsprendžia regimąjį halo plotį (maždaug 1.5°), į kurį sutelpa visos likusios regimojo spektro spalvos. Kadangi šviesos spinduliai negali būti atlenkiami mažesniu kampu, nei minimalus, vidinė halo pusė visada yra tamsesnė už išorinę, o apskritimo viduje matome tik išsklaidytą Saulės šviesą. Galima pastebėti ir tai, kad kaip taisyklė, raudonasis halo kraštas yra žymiai ryškesnis, nei mėlynasis, nes išorinėje pusėje jau persikloja matomos šviesos spinduliai, atlenkiami didesniu nei

minimaliu kampu. 22° halas gerai įžiūrimas aplink Mėnulį, ypač pilnatis metu. Kadangi Mėnulis viso labo tik atspindi Saulės šviesą, tai spalvos dėl mažo jų intensyvumo akimi beveik nematomos (nors jas galima išvelgti nuotraukose). Kai Saulė yra neaukštai pakilusi virš horizonto, dėl regimojo atmosferos storio padidėjimo ir atmosferos sklaidos viršutinė šio halo dalis yra žymiai šviesesnė, nei apatinė¹⁶.

Kur kas rečiau yra matomas didysis arba 46° halas. Jį sąlygoja tie patys strypelių formos ledo kristalai, tačiau šviesa yra laužiama jų viršūnių, sudarančių 90° kampą, o ne briaunų. Vienok didysis halas stebimas kur kas rečiau, nei mažasis, kadangi strypelių pavidalo kristalai labai dažnai būna tuščiaviduriai ir tiesiog neturi taisyklingų stačiakampių briaunų¹⁷.

Parheliai

Parheliai – tai ryškūs ir spalvingi taškai arba dėmės, nutolę 22° atstumu abipus Saulės ir esantys Saulės aukštyje. Jei kartu matosi ir 22° halas, parheliai atrodo kaip šio halo paryškėjimai.



Parheliai yra formuojami orientuotų (taigi pakankamai didelių) plokštelių formos ledo kristalų, todėl jie yra žymiai ryškesni ir spalvingesni, nei pats 22° halas. Dažnai matomas tik vienas iš parhelių. Parheliai būna ryškiausi, Saulei pakilus į 15 laipsnių aukštį virš horizonto. Saulei kylant aukštyje, parheliai silpsta, jų spalvos blanksta, o jie patys palaipsniui tolsta nuo 22° halo. Saulei pakilus aukščiau nei 60° virš horizonto, parheliai išnyksta¹⁸. Jei kristalai nėra idealiai orientuoti, parheliai ištišta vertikaliai, virsdami spalvotais lankais, kuriuos nepatyrę stebėtojai nesunkiai gali supainioti su vaivorykštės fragmentais. Priklausomai nuo debesų formos, parheliai kartais gali įgauti neįtikėtinas formas (2 pav.). Akinamai ryškūs parheliai gali būti palaikyti Saule, jei pastarosios tiesiogiai nesimato. Dėl to parheliai kartais vadinami netikromis saulėmis (mock suns). Be jokios abejonės, parheliai yra patys ryškiausi iš visų Saulės šviesos kuriamų optinių atmosferos reiškinių

Retais atvejais, parheliai gali būti stebimi ir ant lėktuvų paliekamų kondensacijos pėdsakų¹⁹.

Zenitinis lankas

Kai švyti ryškūs parheliai, retkarčiais tiesiai virš galvos sušvinta nepaprasto grožio



spalvingas puslankis (3 pav.). Tai – zenitinis lankas Zenitinis lankas (dar vadinamas Bravės lanku), neskaitant parhelių, yra pats išpūdingiausias iš visų halų. Jis matomas beveik tiesiai virš galvos ir išlinkęs į priešingą pusę nuo Saulės, o jo spalvos yra nepaprastai sodrios ir ryškios. Išpūdi sustiprina ir tai, kad regimasis debesų sluoksnio storis zenite yra mažiausias, tad atrodo, jog zenitinis lankas švyti giedrame danguje. Zenitinį lanką kaip

ir parhelius formuoja tos pačios horizontaliai orientuotos ledo kristalų plokštelės, tačiau šiuo atveju šviesą laužia stačiakampė jų briauna, tad šis halas kartais vadinamas 46° halo viršutiniu tangentiniu lanku. Šis nuostabus grožio halas yra ryškiausias, kai Saulės aukštis virš horizonto yra maždaug 22 laipsniai²⁰. Saulei kylant, zenitinis lankas pamažu plečiasi ir blėsta, kol galų gale visiškai išnyksta, Saulei pasiekus 32 laipsnių aukštį. Panašiai atsiranda ir vadinamasis horizontalinis lankas palei horizontą, tačiau jis stebimas tik Saulei pakilus į didesnę nei 57° aukštį, o ryškiausias jis tampa Saulei esant 68 laipsnių aukštyje. Lietuvoje net ir ilgiausios dienos metu Saulė nepasiekia 60 laipsnių aukščio, tad horizontalinis lankas mūsų platumose, deja, beveik nestebimas.

Tangentiniai lankai

Kai Saulė neaukštai, viršutinis ir apatinis tangentiniai lankai matomi kaip du atskiri



lankai, liečiantys 22° halą jo viršutiniame ir apatiniame taškuose. Tangentiniai lankai išlinkę į priešingas puses nuo Saulės, o kartais matomi tik kaip 22° halo pašviesėjimai viršuje ir apačioje (4 pav.). Saulei kylant aukštyje, tangentiniai lankai ištysta ir susilieja į vientisą vertikaliai suplotą elipsę, supančią apskritą 22° halą¹³. Tangentinius lankus kuria strypelių formos ledo kristalai, kurie dėl sunkio jėgos orientuojasi

horizontaliai. Neįprasta tangentinių lankų (o ir viso ovalinio halo) forma susijusi su tuo,

kad šviesos spinduliai į tokius kristalus krinta įkypai, todėl jų laužiamasis ir mažiausio atlenkimo kampas regimai padidėja.

Atspindžio halai

Atspindžio halai nėra spalvoti, tačiau jie ne mažiau įdomūs ir efektingi. Geriausiai žinomas atspindžio halas yra vertikalus Saulės stulpas – siauras švytintis Saulės “spindulys”, atsirandantis dėl atspindžio nuo horizontalių orientuotų ledo kristalų plokštumų. Geriausiai Saulės stulpas matomas Saulei tekant ar leidžiantis, o ypač efektingai atrodo, kai pati Saulė jau būna nusileidusi už horizonto ar panirusi į debesį (6 pav.). Aukščiausias Saulės stulpas matomas, kai šviesą atspindintys kristalai nėra idealiai lygiagrečiai orientuoti²¹. Šaltu ir ramiu oru, šviesos stulpai gali būti matomi ir nuo gatvės žibintų bei tolimų miesto šviesų. Vaizdas būna ypač efektingas, jei tiesiogiai nesimato pačių šviesos šaltinių.



Parhelinis ratas taip pat yra sąlygojamas šviesos atspindžio, tačiau skirtingai, nei Saulės stulpo atveju, šviesą atspindi vertikalios horizontaliai orientuotų ledo kristalų briaunos. Jei plunksniniai debesys dengia dangų vientisu sluoksniu, parhelinis ratas, esantis Saulės aukštyje, gali juosti visą dangų (5 pav.). Kad parhelinis ratas būtų ryškus, ledo kristalo tipas yra nesvarbus, bet būtina, kad jis būtų orientuotas, taigi didelis. Tačiau dažniausiai matomi tik didesni ar mažesni parhelinio rato fragmentai.

Halai yra vieni nuostabiausių atmosferos optinių reiškinių. Halų stebėjimai ir tyrinėjimai iki šiol tebeturi mokslinę vertę, tad traukia ne tik mėgėjų, bet ir profesionalų dėmesį. Šiaurės šalyse, pvz. Suomijoje, bendradarbiaujant halų stebėjimo entuziastams ir mokslininkams, įsteigti ir veikia gerai organizuoti halų stebėtojų tinklai²², kurie specializuojasi retų ir neįprastų halų stebėjimuose. Būtent šių stebėjimų pasėkoje, neseniai įrodyta, kad esant itin žemoms temperatūroms (apie -80°C), troposferoje susidaro itin retos – kubinės simetrijos ledo kristalai²³. Esant ekstremalioms sąlygoms, ledo kristalų augimo greitis išilgai jo ašių smarkiai skiriasi, todėl net ir heksagoniniai ledo kristalai tampa kitokie – jų višūnės nusmailėja ir primena piramides²⁴. Kai Saulės šviesa

laužia tokie savotiški kristalai, stebime neįprasto skersmens halus, kurie yra tikra retenybė.

Įvairiais vertinimais plunksniniai debesys dengia iki 20% viso Žemės rutulio. Nors plunksninių debesų sluoksnis yra optiškai plonas, šie debesys vaidina svarbų vaidmenį globalioje atmosferos cirkuliacijos sekoje. Plunksniniai debesys, kaip ir žemesnieji troposferos debesys sugeria, praleidžia, atspindi ar išsklaido ne tik kritusią Saulės šviesą, bet ir šiluminę (infraudonąją) spinduliuotę, kurią skleidžia Žemės paviršius. Norint įvertinti plunksninių debesų svarbą vadinamajam šiltnamio efektui, būtina tiksliai žinoti plunksninių debesų sandarą bei jų mikrofizinius ypatumus, t.y. ledo kristalų formą, dydį bei elgseną. Iki šiol plunksninių debesų sąlygojamas šiltnamio efektas yra vienas mažiausiai ištirtų veiksnių, įtakančių visą Žemės klimatą²⁵. Nustatyta, kad vis gausėjantys dirbtiniai plunksniniai debesys – lėktuvų paliekami ilgalaikiai kondensacijos pėdsakai, taip pat ima vaidinti nemenką vaidmenį, ir įtakoja lokalų klimatą²⁶. Tad moksliniai halų stebėjimai iki šiol turtina mokslo žinias apie plunksninių debesų mikrofiziką, apie jų vietą bei įtaką klimato kaitos procesams.

Literatūra:

-
- ¹ P.-P. Hattinga Verschure, Thirty years of observing and documenting sky optical phenomena, *Applied Optics* **37**, 1585-1588 (1998).
- ² A. J. Weinheimer and C. A. Knight, Scheiner's halo: cubic ice or polycrystalline hexagonal ice?, *Journal of the Atmospheric Sciences* **44**, 3304-3308 (1987).
- ³ U. Fantz, Optical phenomena in the open air, *Contemporary Physics* **45**, 93-108 (2004).
- ⁴ D. K. Lynch, Cirrus, ice crystals and halos, *Optics and Photonics News* **12**(1), 32-35 (2000).
- ⁵ J. Naylor, *Out of the blue*, Cambridge University Press, 2002.
- ⁶ M. G. J. Minnaert, *Light and color in the outdoors*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- ⁷ L. Besson, The different forms of halos and their observations, *Monthly Weather Review* **44**, 436-446 (1914); C. S. Hastings, A general theory of halos, *Monthly Weather Review* **50**, 322-330 (1920); E. W. Woollard, The geometrical theory of halos, *Monthly Weather Review* **64**, 321-325 (1936).
- ⁸ W. Tape and G. Konnen, A general setting for halo theory, *Applied Optics* **38**, 1552-1625 (1999).
- ⁹ A. Ono, The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences* **26**, 138-147 (1969); A. B. Fraser, What size of the crystals causes the halos?, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1112-1118 (1979).
- ¹⁰ K. Sassen, Halos in cirrus clouds: why are classical displays so rare?, *Applied Optics* **44**, 5684-5687 (2005).
- ¹¹ J. Nelson, Sublimation of ice crystals, *Journal of the Atmospheric Sciences* **55**, 910-919 (1988).
- ¹² A. H. Auer and D. L. Veal, The dimension of ice crystals in natural clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences* **27**, 919-927 (1970).
- ¹³ D. K. Lynch and W. Livingston, *Color and light in nature*, Cambridge University Press, 2001.
- ¹⁴ R. List and R. S. Schemenauer, Free-fall behavior of planar snow crystals, conical graupel and small hail, *Journal of the Atmospheric Sciences* **28**, 110-115 (1971).
- ¹⁵ K. Sassen, J. Zhu, and S. Benson, Midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote sensing. IV. Optical displays, *Applied Optics* **42**, 332-341 (2003).
- ¹⁶ S. D. Gedzelman, Visibility of halos and rainbows, *Applied Optics* **19**, 3068-3074 (1980).
- ¹⁷ K. Sassen, N. C. Knight, Y. Takano, and A. J. Heymsfield, Effects of ice-crystal structure on halo formation: cirrus cloud experimental and ray-tracing modeling studies, *Applied Optics* **33**, 4590-4601 (1994).
- ¹⁸ R. S. McDowell, The formation of parhelia at higher solar elevations, *Journal of the Atmospheric Sciences* **31**, 1876-1884 (1974).

-
- ¹⁹ R. Sussmann, Optical properties of contrail-induced cirrus: discussion of unusual halo phenomena, *Applied Optics* **36**, 4195-4201 (1997).
- ²⁰ R. S. McDowell, Frequency analysis of the circumzenithal arc: Evidence for the oscillation of ice-crystal plates in the upper atmosphere, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1119-1123 (1979).
- ²¹ A. J. Mallmann, J. L. Hock, and R. G. Greenler, Comparison of Sun pillars with light pillars from nearby light sources, *Applied Optics* **37**, 1441-1449 (1998).
- ²² M. Pekkola, Finnish halo observing network: search for rare halo phenomena, *Applied Optics* **30**, 3542-3552 (1991).
- ²³ M. Riikonen, M. Sillanpaa, L. Virta, D. Sullivan, J. Moilanen, and I. Luukkonen, Halo observations provide evidence of airborne cubic ice in the Earth's atmosphere, *Applied Optics* **39**, 6080-6085 (2000).
- ²⁴ P. J. Neiman, The Boulder, Colorado, concentric halo display of 21 July 1986, *Bulletin of the American Meteorological Society* **70**, 258-264 (1989).
- ²⁵ K. N. Liou, Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective, *Monthly Weather Review* **114**, 1167-1199 (1986).
- ²⁶ B. Strauss, R. Meerkotter, B. Wissinger, P. Wendling, and M. Hess, On the regional climatic impact of contrails: microphysical and radiative properties of contrails and natural cirrus clouds, *Annales Geophysicae* **15**, 1457-1467 (1997).